



Energiforskning på Risø. En række foredrag holdt på Risø i efteråret 1978. Kompendium

Forsøgsanlæg Risø, Roskilde

Publication date:
1978

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Forsøgsanlæg Risø, R. (1978). *Energiforskning på Risø. En række foredrag holdt på Risø i efteråret 1978. Kompendium*. Risø National Laboratory. Risø-M No. 2126

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Risø

Risø-M- 2126

Risø-M- 2126	Title and author(s)	Date August 1978
	ENERGIFORSKNING PÅ RISØ. En række foredrag holdt på Risø i efteråret 1978. KOMPENDIUM	Department or group Reaktorteknik
	pages + tables + illustrations	Group's own registration number(s)
	Abstract	Copies to VVS-gruppen (300) Biblioteket (100) Reaktorteknik (50)
	Available on request from Risø Library, Risø National Laboratory (Risø Bibliotek, Forsøgsanlæg Risø), DK-4000 Roskilde, Denmark Telephone: (03) 35 51 01, ext. 334, telex: 43116	

ISBN 87-550-0553-5

ISSN 0418-6435

FORORD

På foranledning af Ingeniør-sammenslutningens VVS-gruppe arrangeres i efteråret 1978 på Risø en foredragsrække fordelt på 4 eftermiddage.

Foredragene søger at belyse forskellige sider af energi-forskningen på Risø. Valget af emner er resultatet af en række diskussioner med VVS-gruppens repræsentanter. Udvalgelsen har blandt andet været dikteret af ønsket om at medtage emner, der kunne være af særlig interesse for gruppen.

Dette kompendium, der indeholder de 11 foredrag i sammen-trængt form, er udarbejdet før arrangementets begyndelse, og de endelige foredrag vil evt. afvige på en række punkter, f.eks. på grund af nyere resultater.

Vagn S. Pejtersen

INDHOLDSFORTEGNELSE

	<u>Side</u>
A. DET DANSKE ENERGISYSTEM: FORBRUG OG FORSYNING, Ove W. Dietrich, Energisystemgruppen	5
B. HELBREDSMÆSSIGE PÅVIRKNINGER FRA ANVENDELSE AF A-KRAFT, KUL OG OLIE, H.L. Gjørup, Helsefysisk Afdeling	17
C. VVS-REAKTORSYSTEMER OG KVALITETSSIKRING, F. List, Reaktorteknikafdelingen	31
D. RADIOAKTIVT AFFALD, DENS OPSTÅEN OG OPLAGRING, K. Brodersen, Behandlingsstationen	41
E. RISØ'S ARBEJDE MED VINDENERGITEKNIK, Helge Petersen, Reaktorteknikafdelingen	51
F. SOLENERGI TIL BOLIGOPVARMNING, Knud L. Thomsen, Reaktorteknikafdelingen	61
G. SÆSONLAGRING AF FJERNVARME I UNDERGRUNDEN, J. Leth, K. Hansen, Forsøgssektionen	75
H. LAVTEMPERATUR OVERSKUDSVARME TIL ELPRODUKTION, J. Westermann, Forsøgssektionen	85
I. SYSTEMPÅLIDELIGHED, Dan Nielsen, Elektronikaf- delingen	97
J. METAL - BRINT I VARMESYSTEMER, B. Vigeholm, Metallurgiafdelingen	105
K. FUSION, FREMTIDENS ENERGIFORSYNING?, P. Nielsen, Fysikafdelingen	111

A. DET DANSKE ENERGISYSTEM: FORBRUG OG FORSYNING

Ove W. Dietrich, Energisystemgruppen

Energiomsætning

Energi er mange ting - i hvert fald når vi taler om samfundets energiforbrug. Energien optræder under mange former f.eks. som mekanisk energi, som elektrisk energi og som varme. Naturens cirkling - mennesket og det danske samfund indbefattet - er en fortsat kæde af energiomdannelser fra en form til en anden, og altid med varme som slutproduktet. Langt den overvejende del af energien stammer fra solens stråling, som gennem fotosyntesen omdannes til kemisk energi. Det er den energi vi "lever" af, det er den energi, der er oplagret i de fossile brændsler kul, olie og naturgas, - og ikke at forglemme - det er fotosyntesen, som har produceret ilten i jordens atmosfære.

En stor del af energiomsætningen sker således "naturligt", men vort højt industrialiserede samfund har behov for et stadigt stigende tilskud af energi. Det er denne "ikke-naturlige" energiomsætning vi vil beskæftige os med i det følgende.

Energibalance

Energiens strømning fra primært brændsel til slutanvendelse kan illustreres i en såkaldt energibalance. Danmarks energibalance for 1977 er vist i fig. 1 (udarbejdet og velvilligt stillet til rådighed af Dansk Kedelforening og Danske Elværkers Forenings Udredningsafdeling). Danmark importerer, som det fremgår til venstre i figuren, langt den overvejende del af sin energi. Vor egen energi (olie fra Nordsøen, skrald og affald) udgør kun ca. 4% af det samlede energiforbrug. Energien "strømmer" mod højre i figuren mod slutanvendelse i forskellige sektorer af samfundet. En del energi omdannes til en anden energiform undervejs i systemet, f.eks. i kraftværker eller fjernvarmeværker. Den nederste del af figuren viser de centrale konverteringstab ved disse omdannelser.

Olien

Det mest iøjnefaldende ved Danmarks energibalance er oliens dominans.

I 1977 dækkedes 81% af vort energibehov af olie. Det er dog en forbedring - både absolut og relativt - i forhold til situationen før oliekrisen 1973/74, hvor olieandelen var 93% (1972). Årsagen til denne reduktion af olieforbruget er i nogen grad besparende foranstaltninger, men navnlig kraftværkernes omlægning mod højere kulforbrug. I 1972 var 79% af det anvendte kraftværksbrændsel olie, i 1977 var olieandelen faldet til ca. 50% (se fig. 1), og denne tendens vil fortsætte. I følge om- og udbygningsplaner for kraftværkerne vil olieandelen i midten af 1980'erne være ca. 20%.

Denne udvikling bort fra olie afspejler naturligvis frygten for en ny oliekrise og/eller kraftigt stigende oliepriser. Olieforbruget i verden stiger for øjeblikket med 4% om året, og selvom produktionen stadig kan holde trit med forbruget, forventes produktionen at stagnere om 10-20 år. På det tidspunkt vil de lettest tilgængelige oliefelter være nær tømning, og det bliver nødvendigt at inddrage felter, som er vanskeligere tilgængelige, og at anvende mere kostbar udvindingsteknologi.

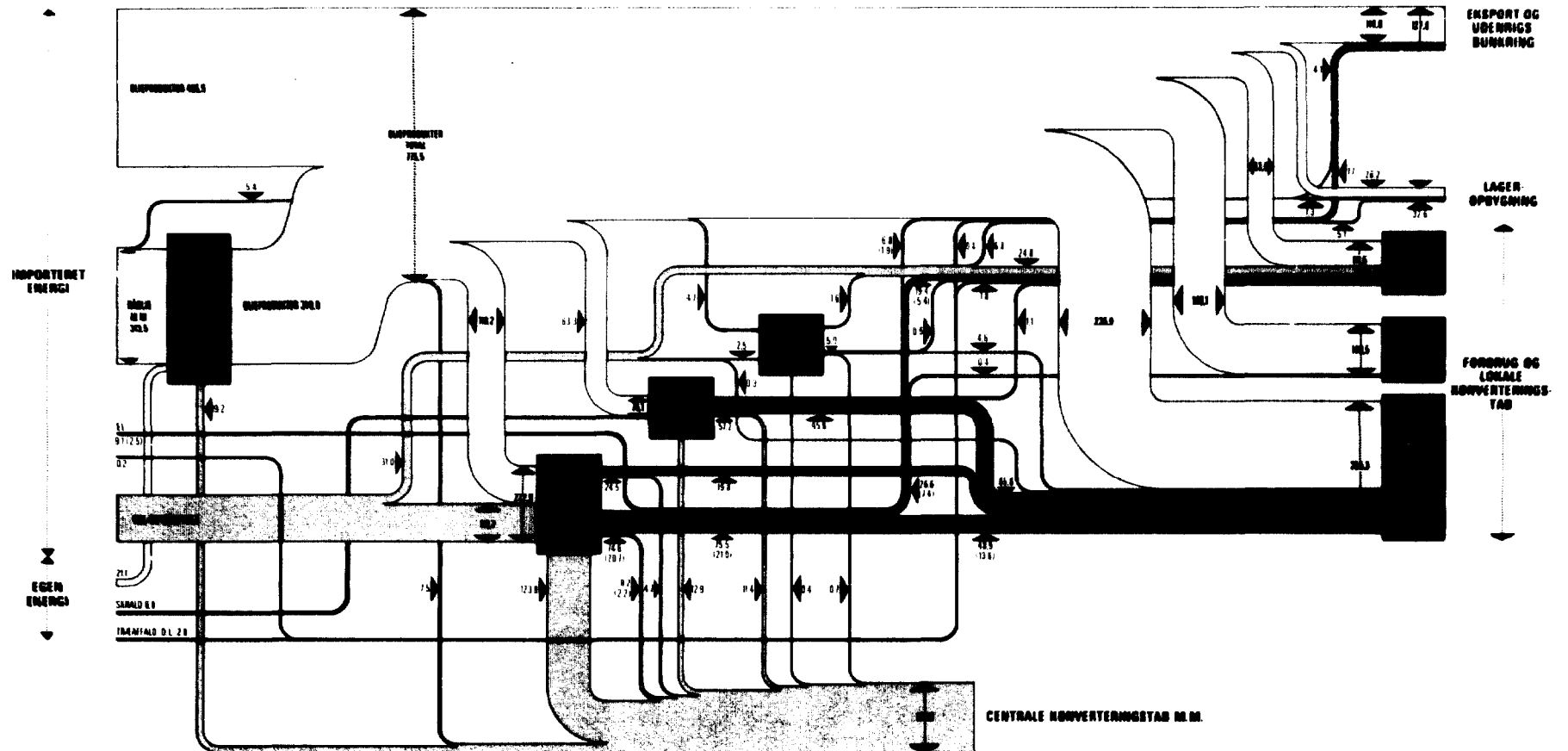
Der er derfor al mulig grund til, som det også er udtrykt i Handelsministeriets energiplan "Dansk Energipolitik 1976" (DE-76), at arbejde seriøst imod en reduktion af vor olieafhængighed.

Besparelser

Allerede fra 1975 - et år før energiplanen blev fremlagt - blev der givet mulighed for offentlig støtte til energibesparende foranstaltninger i eksisterende bygninger. Indtil udgangen af 1977 er der bevilget over 2 mia. kr i støtte og det må forventes at tilskuddene har resulteret i samlede investeringer på over 4 mia.kr. For de kommende år er der planer om yderligere investeringer på 13 mia. kr til besparelser i bygninger ².

De første erfaringer med hensyn til udbyttet af disse investeringer har desværre ikke været særlig lovende. I sin første delbetænkning ³ fra oktober 1977 udtrykker Handelsministeriets Varmeplanudvalg stor betænkelse ved det faktum, at trods investeringer på det tidspunkt på 2-3 mia.kr stiger energiforbruget til rumopvarmning stadig. Målet fra DE-76 - at reducere energiforbruget til rumopvarmning med 18% i 1985 - synes endnu ikke i sigte.

Danmarks energibalance 1977
 mælt i PJ. (TWh i parentes for elektricitet)



Danmarks Energibalance 1977.

Udarbejdet af
DANSK KEDELFORENING og DEFU
(Danske Elværkers Forenings
Udredningsafdeling).

Med udgangspunkt i oplysninger fra Energistyrelsen og Danmarks Statistik, suppleret med oplysninger fra Danske Fjernvarmeværkers Forening og andre berørte institutioner samt enkelte skøn og vurderinger, er der - i lighed med tidligere år - opstillet en energibalance for Danmark for året 1977.

Ved sammenligning med tidligere års energibalancer bør det tillægges særlig opmærksomhed, at målestokken for skemaet i forbindelse med overgang til SI-enheder er ændret til PJ (10^{15} J). For elektricitetens vedkommende er værdien i TWh dog tilføjet i parentes, da kWh stadig vil blive anvendt som enhed for elektricitet.

1. ENERGITILGANG.

Produktion af raolie fra Nordsoen er steget med mere end 150% til 21.1 PJ mod 8.3 PJ i 1976. Af denne raoliemængde er 4.1 PJ eksporteret.

Raffinaderiernes produktion er faldet lidt, således at importen af færdige olieprodukter er steget med i alt ca. 10%.

Kulforbruget er steget ca. 15% fra 1976, samtidigt med at lagrene atter er forøgede. Kulimporten er således steget med i alt 31% i forhold til 1976.

I lighed med tidligere år er tilførsel og forbrug af olieprodukter til »ikke energimæssige formål« udeladt, d.v.s. bitumen, ekstraktionsbenzin og mineralsk terpentin.

Bruttoenergiforbruget (energiforbruget inkl. de centrale konverteringstab, men ekskl. raffinaderiernes tab) androg 782.3 PJ. Efter fradrag af de centrale konverteringstab på kraft-, fjernvarme- og

gasværkerne androg energiforbruget 645.2 PJ.

2. ENERGIFORMNING.

Kraftværkernes elproduktion steg i 1977 med 7.8% til 74.6 PJ (20.7 TWh), mens disses fjernvarmeproduktion faldt med 1.4% til 24.5 PJ. Brændselsforbruget steg for oliens vedkommende med 2.8% til 2.720.000 t (110.2 PJ) og for kullenes vedkommende med 15.8% til 4.543.600 t (112.7 PJ).

Fjernvarme. Fjernvarmeproduktionen på fjernvarmeværker og forbrændingsanstalter har fra 1976 haft en stigning på knapt 9%. Sammenholdt med fjernvarmeproduktionen på kraftværkerne giver dette i alt en stigning i fjernvarmeproduktionen på 5.6%.

Gasværkernes brændselsforbrug var for oliens vedkommende næsten uændret (4.7 PJ), mens forbruget af fast brændsel faldt med ca. 20% til 2.5 PJ.

3. ENERGIANVENDELSE.

På diagrammet er forbruget i lighed med andre år opdelt på de tre traditionelle hovedkategorier:

Industri: 111.5 PJ. Fremstillingsvirksomhed med 20 eller flere ansatte (ekskl. raffinaderierne).

Transport: 149.5 PJ. Landtransport, lufttransport, indenrigs bunkring, forsvar og fiskeriet.

Bolig og erhverv m.m.: 355.3 PJ. Forbrug til rumopvarmning og varmt brugsvand, belysning, ventilation samt øvrige apparater og i en vis udstrækning procesforbrug indenfor boliger, landbrug, skovbrug, gartneri, bygge- og anlægsvirksomhed, institutioner, handel, service samt håndværk og mindre fremstillingsvirksomhed. Indenfor hver af disse grupper er energianvendelse forbundet med lokale konverteringstab, f.eks. tab i forbrændingsmotorer og fyringsanlæg. Anvendelsen af el og fjernvarme til opvarmningsformål danner en undtagelse herfra.

3.1. INDUSTRI.

Med udgangspunkt i tidligere opgørelser af industriens energiforbrug og de seneste års relative produktionsændringer, er forbruget i 1977 opgjort til 111.5 PJ. Størstedelen af energiforbruget (godt 80%) er procesforbrug, mens resten går til rumopvarmning og industriens egen elproduktion, idet sidstnævnte i 1977 androg 1.3 PJ (0.4 TWh).

3.2. TRANSPORT.

Forbruget af forskellige energiformer fremgår af følgende skema.

PJ	Fly	Tog	Biler	Skibe	I alt
Jet-fuel	33.5	0	0	0	33.5
Diesel-gasolie	0	4.2	23.3	14.7	42.2
Fuelolie	0	0	0	2.1	2.1
Benzin	0.3	0	69.5	0	69.8
El	0	0.4	0	0	0.4
Flaske-gas	0	0	1.5	0	1.5
I alt	33.8	4.6	94.3	16.8	149.5

Under »skibe« er også medregnet fiskerflådens forbrug.

3.3. BOLIG OG ERHVERV.

I lighed med tidligere år er »bolig« og »erhverv m.m.« søgt adskilt.

Boliger. Rumopvarmningsbehovet er graddagsafhængigt. Brændselsforbruget er derimod kun delvis graddagsafhængigt, bl.a. på grund af indflydelse fra de lokale konverteringstab samt forbruget af varmt vand. Sædvanligvis regnes med, at 1% afvigelse fra det glidende normalårs graddagstal medfører ½% afvigelse fra normalårets brændselsforbrug. Gennemsnittet af sol- og skyggegraddage var 2571 i 1977, mens det for det glidende normalår 1952 til 1977 var 2699 (malt ved Landbohøjskolen).

PJ	Udvalgte energiformer	Samlet forbrug	Andelen af totalforbruget
Land- og skovbrug	15.0	149.5	10.0%
Landbrug	14.0	149.5	9.4%
Bygge- og anlægsvirksomhed	5.5	149.5	3.7%
Handel og service	54.4	149.5	36.4%
Minde fremstillingsvirksomheder	14.2	149.5	9.5%
Gade- og vejbelysning	0	149.5	0.0%
I alt	104.1	149.5	69.7%

Erhverv:

PJ	Udvalgte energiformer	Samlet forbrug	Andelen af totalforbruget
Land- og skovbrug	15.0	149.5	10.0%
Landbrug	14.0	149.5	9.4%
Bygge- og anlægsvirksomhed	5.5	149.5	3.7%
Handel og service	54.4	149.5	36.4%
Minde fremstillingsvirksomheder	14.2	149.5	9.5%
Gade- og vejbelysning	0	149.5	0.0%
I alt	104.1	149.5	69.7%

4. EKSPORT OG UDENRIGS BUNKRING.

Ved udenrigs bunkring forstås tankning i danske havne af danske og udenlandske skibe med udenlandsk bestemmelsessted.

Danske skibes tankning i udenlandske havne indgår ikke i energibalancen.

Anvendte enheder:

1 PJ = 10^{15} J = 239 Tcal = 0.27 TWh.

1 PJ svarer til 23.900 tons

olieækvivalenter.

1 TWh = 10^9 kWh = 860 Tcal = 3.6 PJ.

Medens investeringerne i besparende foranstaltninger vel efterhånden vil vise sig i et reduceret energiforbrug og dermed også i et reduceret olieforbrug, har de ikke ubetinget bedret situationen for Danmark under en oliekrise. Det hænger sammen med de internationale aftaler om olieudligning i krisesituationer. Danmark er tilsluttet IEA - "International Energy Agency" - som dannedes i 1974 indenfor rammerne af OECD som et modstykke til de olieeksporterende lændes organisation OPEC. I tilfælde af en oliekrise fordeler IEA olieleverancer til medlemslandene i forhold til deres normalforbrug. De lande, der som Danmark har nedskåret det normale olieforbrug mest muligt, vil være dårligst stillet, for de ikke med simple midler kan reducere forbruget yderligere under en krise. Eller sagt på en anden måde - hvis man allerede har installeret termoruder, hjælper plastik for vinduerne ikke mere. Derfor bør vi næppe i den nuværende situation henregne besparelser til de foranstaltninger, der forbedrer forsyningssikkerheden - men alligevel er det sikkert en god investering at spare.

Kraftvarme og fjernvarme

Kraftvarme er en betegnelse for fjernvarme fra kraftværkernes spildvarme. I 1977 produceres 30% af fjernvarmen i Danmark på kraftværkerne. Kraftvarmeværker bygges i to anlægstyper - modtrykswærker og udtagsværker. I modtrykswærker, som bygges i små enheder op til ca. 75 MW, er der et fast forhold imellem el- og varmeproduktion. Varmen afgives til fjernvarmenettet fra returledningen fra turbinen. Udtagsværker bygges i store enheder, 600-1000 MW, og har specielle dampudtag i forskellige turbineled. Her kan forholdet imellem el- og varmeproduktionen reguleres, men den samlede virkningsgrad er lidt mindre end for modtrykswærker.

Med den voksende "energibevisthed", bør spildvarme naturligvis udnyttes, hvis det er muligt. Problemet er bl.a., at det er kostbart at ledningsføre varmt vand, og at en del kraftværker ligger afsides i forhold til forbrugscentre. Af de 18 primære kraftværker i Danmark, som producerer mere end 99% af det samlede elforbrug, leverer de 9 samtidig varme idag. Varmeleveringen svarer til ca. 10% af det samlede rumopvarmningsbehov. Det er

antagelig bliver lægt under kraftvarmeområder, og vil der tjene som reserve- og spidslastcentraler. På længere sigt kan kernevarmeværker, som kan bygges med store sikkerhedsmarginer og lægges direkte i byområder eventuelt komme på tale. Indtil da vil der for de øvrige fjernvarmecentraler være to muligheder for omlægning, enten til kulfyring med nye og mindre forurenende forbrændingsmetoder - eller til naturgas.

Naturgas

Naturgassens mulige anvendelse i Danmark er blevet aktuelt, efter at Dansk Undergrunds Consortium (DUC) i foråret 1978 har bedømt udvinding fra gasfelterne i den danske del af Nord-

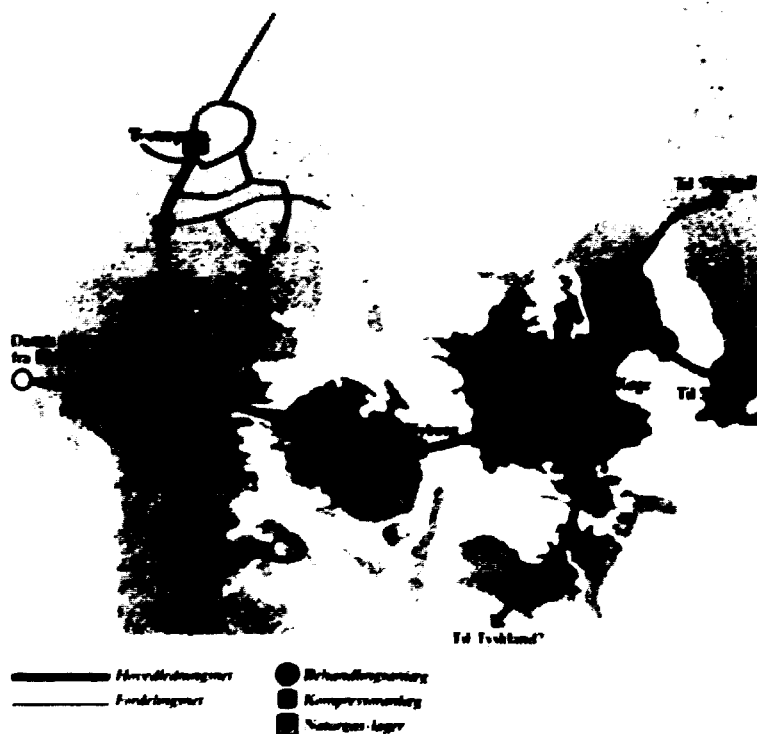


Fig. 3. Foreslået gasnet i Danmark
(Figurer er reproduceret fra ref. 2)

søen til at være økonomisk rentabel ⁴. Problemet er, om det er økonomisk rentabelt at bruge gassen i Danmark. For at udnytte gassen skal der etableres en søledning fra felterne til Esbjerg til noget over 1 mia. kr. og et transmissions- og distributionsnet til omkring 9 mia.kr. (se fig. 3).

For at disse store forhåndsinvesteringer skal kunne forrentes, skal der være et stort marked - og helst hele året rundt. De oprindelige vurderinger i DE-76 antog, at 30% af rumopvarmningsbehovet i 1985 og 40% i 1995 skulle dækkes af naturgas ved fortrinsvis at føre gassen frem til de enkelte boliger, hvor gassen vil erstatte den dyreste olie- gasolien. Om sommeren kan disse individuelle kunder imidlertid ikke aftage nok gas, og der må derfor findes andre kunder - formodentlig industri og fjernvarmeværker - som kan bruge gas om sommeren og olie om vinteren. Omkring 50% af kunderne, målt i forhold til deres gasforbrug, skal faktisk have dobbelt fyringsmulighed, for at der kan opnås en rimelig forrentning af investeringerne i platforme og net. Kraftværkerne er ude af billedet i denne sammenhæng, fordi gassen forventes at blive 2-3 gange dyrere end kul. Hertil kommer som et meget væsentligt punkt, at de mest fordelagtige markedsområder for naturgas er de tæt befolkede områder, naturligvis specielt i og omkring København. Men det er netop de samme områder, som er kraftvarmens bedste markeder. Vi må derfor vælge - hvis vi vil udnytte den tilrådighed værende spildvarme fra kraftværkerne, specielt i Københavnsområdet, så er gasprojektet næppe rentabelt. Afsætningsproblematikken for gassen kan derfor ikke siges at være løst endnu, men der arbejdes i Handelsministeriets Varmeplanudvalg med forslag til områdefægrænsninger imellem forskellige opvarmningsformer.

Et andet specielt forhold ved naturgassen er at varigheden af levering fra de danske felter er begrænset - efter nuværende vurderinger til 20-30 år. Det vil sige, at vi allerede nu bør tænke på, hvad vi kan fylde i gasnettet efter den tid. Mest sandsynligt er det, at vi må købe flydende naturgas fra f.eks. Mellempøsten eller Nordafrika, antagelig til en pris omkring eller lige over olieprisen. Omdannelse af kul til syntetisk na-

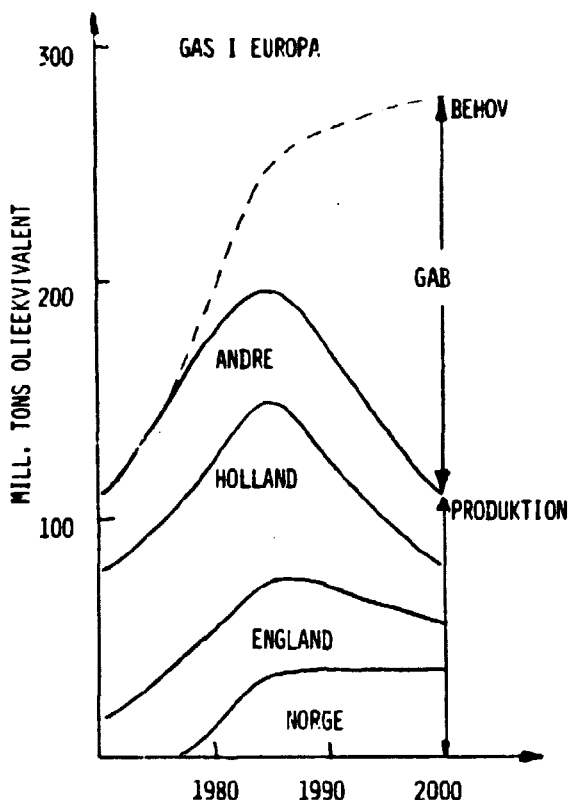
turgas er dog også en mulighed.

Ind i overvejelserne om naturgas i Danmark bør det også komme, at andre lande i Europa, som allerede har et naturgasnet, formodentlig kommer til at mangle naturgas fra næste årti. I de såkaldte WAES-studier om verdens energisituation er Europas gasforbrug og gasproduktion vurderet som vist på fig. 4. I det

gab, som forventes at danne sig mellem behov og produktion fra midten af firserne, vil der næppe være afsætningsvanskeligheder for Nordsø-gassen på det europæiske marked, hvis vi beslutter os til ikke at udnytte gassen i Danmark.

Kernekraft

Kernekraften har det tilfælles med naturgassen, at den er meget kapitalkrævende. Kernekraftværker koster pr. installeret kW omkring 3600 kr., mod ca. 2200 kr for et kul/oliefyret anlæg uden svovlrensning af røggasserne og ca. 2700 kr med svovlrensning. Til gengæld er kernebrændslet billigt - ca. 15 kr/Gcal mod ca. 35 kr/Gcal for kul og ca. 50 kr/Gcal for kraftværksolie. Det samlede regnestykke viser, at med disse nugældende brænd-



Figuren viser den internationale arbejdsgruppe WAES' skøn over udviklingen af gas efterspørgsel og intern gasforsyning i Europa. - Gabet mellem behov og forsyning må sandsynligvis dækkes med importeret LNG.

Figur 4

selspriser, er elektricitet produceret på kernekraftværker 10-30% billigere end elektricitet produceret på kulbasis, selv når deponering af det radioaktive affald og nedrivning af værkerne er medregnet. Denne prisforskel er måske ikke særlig afgørende idag, men det er værd at notere sig, hvor stor en del af elektricitetsprisen, der hidrører fra brændslet.

For kernekraft er ca. 40% af elprisen brændselsudgifter - for kulkraft ca. 75% - resten er andre driftsudgifter (ca. 10%) og kapitaludgifter. Medens drifts- og kapitaludgifterne må formodes at følge det almindelige prisniveau, antages alle brændselspriser at stige kraftigere - trukket med op af olien. Og disse brændselsprisstigninger slår stærkest igennem, hvor brændselsprisen udgør den største andel af elprisen. Det er derfor sandsynligt, at forskellen imellem priserne for kernekraft og kulkraft bliver større i fremtiden. Da det tager op mod ti år fra en beslutning om indførelse af kernekraft tages til det første værk kan idriftsættes, kan Danmark tidligst drage fordel af den billigere kernekraft omkring 1990. Til gengæld opererer DE-76 med en ret hurtig udbygningstakt efter 1990, med ialt 5 kernekraftværker idriftsat med to års mellemrum hver på ca. 1000 MW installeret effekt.

Men endnu mangler en folketingsbeslutning om at sætte dette program igang. Elsam har vurderet, at forsinkelsen koster alene deres forbrugere en halv milliard kroner om året.

Supplerende energikilder

I DE-76 forudses supplerende energikilder at yde et vist bidrag til opvarmning og elproduktion i fremtiden. Til opvarmningsformål regnes i 1995 med ca. 10% bidrag fra supplerende energikilder, og til elproduktion regnes med ca. 3% bidrag. Under supplerende energikilder henregnes dels de såkaldte vedvarende energikilder, specielt solvarme og vindenergi, og dels udnyttelse af skrald, halm og andet biologisk materiale til forbrænding eller forgasning. Tillige medtages også geotermisk varme og den forbedrede udnyttelsesgrad af elektricitet til opvarmning, som kan opnås ved anvendelse af varmepumper. Det er således en meget blandet gruppering, og da det samlede bidrag til energiforsyningen vil være beskedent i dette århundrede, og en del af de følgende artikler i øvrigt omhandler dette emne, skal der kun ofres få bemærkninger her på supplerende energikilders indpasning i energisystemet.

Som nævnt tidligere vil en stor del af Danmark - formentlig over 2/3 målt i antal mennesker - blive varmforsynet med en kollektiv opvarmningsform, d.v.s. enten naturgas eller fjernvarme. I de områder, der udlægges til fjernvarme - eller gas-

forsyning, er det formentlig nødvendigt af samfundsøkonomiske grunde at indføre tilslutningspligt⁵. Derved begrænses markedet for supplerende energikilder til opvarmningsformål til den resterende "trediedel" af Danmark. Hvorledes de her vil konkurrere indbyrdes, eller med fortsat oliefyring eller elvarme er endnu uafklaret. Et udvalg under Varmeplanudvalget søger for nærværende at belyse dette spørgsmål.

Større vindgeneratorer tilkoblet elnettet har sine specielle problemer. Selvom møllerne bygges til at levere konstant udtagseffekt over et vist interval af vindhastigheder, er det vanskeligt at undgå transientproblemer, hvis vinden løjer af eller tager til. Energien i vinden er proportional med tredje potens af vindhastigheden, så fluktuationer i vindhastigheden kan betyde ind- og udkoblinger over så korte tidsrum, at elværkerne ikke kan nå at kompensere for dem. Et lager i form af et luftmagasin eller et sekundært brændsel kunne teknisk løse dette problem, men omkostninger ved sådanne lagre er idag prohibitive for denne løsning. En undersøgelse⁶ har vist, at med den nuværende sjællandske værkskonfiguration, kan der accepteres 5-10% vindelektricitet tilsluttet elnettet.

Energiforsyning på længere sigt

De foregående betragtninger over vore energiforsyningsmuligheder har alle drejet sig om aktuelle problemer. Men engang i løbet af næste århundrede vil olie, naturgas og måske uran til letvandsreaktorer være sjældne varer. Hvad skal vi da sætte istedet?

Det antages, at jordens kulforekomster vil række til flere hundrede års forbrug. Der arbejdes idag verden over med udvikling af forskellige kulteknologier, som f.eks. bedre forbrændingsmetoder med reduceret forurening (fluidized bed), omdannelse af kul til syntetisk naturgas og omdannelse til flydende brændsel. Kul vil uomtvisteligt spille en større rolle end idag, men de problemer vi allerede hører om nu, hvor især de åbne miner ødelægger landskabelige værdier, vil sikkert skabe vanskeligheder for kuludvinding i virkelig stor skala.

Af nye teknologier synes der at tegne sig 3 muligheder:

formeringsreaktoren, øget udnyttelse af solenergi og fusionsreaktoren. Formeringsreaktoren er allerede en realitet idag. I Frankrig har en formeringsreaktor kaldet PHENIX på 250 MW produceret elektricitet uden problemer i mere end 2 år, og en 5 gange så stor SUPER PHENIX er under bygning. Medens letvandsreaktoren kun udnytter den sjældne uranisotop U^{235} , udnytter formeringsreaktoren også den hyppige isotop U^{238} ved at omdanne den til plutonium, der er et godt reaktorbrændsel. Formeringsreaktoren får derved i forhold til letvandsreaktoren mere end 50 gange så meget energi ud af naturligt uran. Der er næppe uovervindelige tekniske problemer ved at udvikle formeringsreaktoren til kommercielt niveau, men der er for øjeblikket visse politiske problemer, især i USA. Det hænger sammen med, at plutonium er et våbenmateriale. Imidlertid er den sammensætning af plutoniumisotoper, som produceres i en kraftreaktor, et meget dårligt våbenmateriale, og forhåbentlig vil effektiv kontrol mod spredning kunne etableres, således at denne energikilde kan udnyttes.

For at udnytte solenergien i stor skala må den omsættes til et sekundært brændsel. Det kan være elektricitet eller måske brint. Teknologierne hertil kendes idag, både som solceller og som fokuserende solanlæg enten til produktion af damp til turbiner eller varme til termokemisk spaltning af vand i ilt og brint. Men ingen af disse teknologier er økonomisk konkurrencedygtige idag (solceller er mindst 50 gange for dyre). Det er dog meget sandsynligt, at udviklingen på længere sigt kan gøre solenergien rentabel i solrige egne. I Danmark får vi næppe glæde af solen til andet end varmt vand.

Fusionsenergien er den mest usikre af de tre langtidsmuligheder. Til gengæld er den, hvis det lykkes at løse de teknologiske problemer, en næsten uudtømmelig energikilde. Brændslet er deuterium - tung brint - som findes i havvand. For at fusionsprocessen kan finde sted skal deuterium holdes i rimelig koncentration på meget høje temperaturer (ca. 100 mill. grader). Løsningen på dette tekniske problem er antagelig at bygge meget store anlæg. Om det kan lade sig gøre, får vi nok ikke at vide før omkring århundredskiftet, og hvis det kan, bliver anlæggene nok så store, at vi må rejse udenlands for at se, hvordan de ser ud.

Referencer

1. "Dansk Energipolitik 1976", Handelsministeriet, april-maj 76.
2. "De offentlige investeringer 1978-90", Planredegørelse 1, Finansministeriet, Budgetdepartementet 1977.

og
"Redegørelse til Folketinget om de offentlige investeringer", Finansministeriet, 16. maj 1978.
3. "Varmeplanlægning", Første delbetænkning fra Handelsministeriets Varmeplansudvalg, Handelsministeriet, oktober 1977.
4. "DUC Gas Rapport", Dansk Boreselskab 1978
se også
"Rapport om tilvejebringelse af beslutningsgrundlag angående produktion af naturgas fra CORA, DAN, VERN og BENT felterne i den danske Nordsø Sektor", De Golyer and MacNaughton, 1. maj 1978.
5. "Organisation og styring af varmforsyningsplanlægning", Anden delbetænkning fra Handelsministeriets Varmeplanudvalg, Handelsministeriet april 1978.
6. "Vindkraft i elsystemet", Rapport fra en ATV-arbejdsgruppe vedrørende vindkraft i elsystemet, ATV april 1977.

B. HELBREDSMÆSSIGE PÅVIRKNINGER FRA
ANVENDELSE AF A-KRAFT, KUL OG OLIE

H.L. Gjørup

Generelle betragtninger vedrørende risici

Enhver form for menneskelig aktivitet indebærer en vis risiko for ulykker og sygdom med eventuelle for tidlige dødsfald og invaliditet til følge. Energiproduktion er ikke nogen undtagelse. Til en vis grad er man selv herre over, hvor store de helbredsmæssige omkostninger bliver. Risiciene kan næsten altid reduceres gennem forøgede ofre i form af ressourcer og anstrengelser. Ideelt bør de samlede ofre på risikoreducerende foranstaltninger være netop så store, at de sammenlagt med den herefter tilbageværende risiko repræsenterer den mindst mulige belastning for samfundet. I cost-benefit analysen for et energisystem indgår denne sum på omkostningssiden sammen med de regulære produktionsomkostninger og andre byrder, som kan være endnu vanskeligere at bedømme og kvantisere som f.eks. usikkerhed med hensyn til råenergiforsyning eller æstetiske ulemper.

I det følgende skal vi se nærmere på forøget sygelighed og dødelighed som følge af elektricitetsproduktion på grundlag af uran, kul og olie. Andre råenergiformer vil også blive berørt. Selvom usikkerheden i bedømmelsen af helbedsbelastningen er stor, kan det dog konkluderes, at kul og olie er meget mere belastende energikilder end uran. Absolut set kan den helbedsmæssige risiko måske synes stor, men begge brændselskredsløb repræsenterer dog for den gennemsnitlige samfundsborger kun en ubetydelig forøgelse af den sundhedsrisiko, han iøvrigt løber i sit daglige liv, og sammenlignet med helbedsmæssige omkostninger, som samfundet accepterer i andre sammenhænge som f.eks. motorkørsel, er risikoen lille.

Kul og olie

Ved bedømmelse af en råenergikildes helbedsmæssige påvirkning bør alle processer, som er nødvendige for dens udnyttelse, tages med i regnskabet - altså f.eks. for kul: minedrift, transport, kraftværksdrift og affaldsdeponering.

Skaderne fra de to første led i kæden er forholdsvis lette at gøre op. Det drejer sig om dræbte og sårede ved mineulykker og transportulykker samt om sygdomme i forbindelse med arbejdet i minerne, først og fremmest "sorte

lunger" på grund af indånding af kulstøv. Ofrene kan identificeres og tælles.

Ser man på det næste led i kæden, kraftværksdrift, bliver det straks meget vanskeligere. Arbejdsulykkerne overskygges her helt af den resulterende luftforurenings påvirkning af folkesundheden. Der afgives store mængder af giftige affaldsstoffer til atmosfæren. Et 1000 MW(e) kulfyret værk frigiver således årligt ca. 40.000 tons svovldioxid og ca. 45.000 tons kvælstofdioxid, og askemængden er ca. 200.000 til 250.000 tons pr. år. Denne aske indeholder mange giftige grundstoffer og også langlivede radioaktive stoffer. Som det fremgår af tabel 1 er mængderne store. Afhængig af filtreringssystemet i skorstenen spredes mellem 1 og 10 % af denne askemængde i omgivelserne. Resten udgør et ikke ubetydeligt affaldsdeponeringsproblem.

Tabel 1

Stof	Omtrentlig årlig mængde i kg.
Arsenik	90.000
Barium	300.000
Klor	20.000
Mangan	70.000
Kviksølv	20.000
Nikkel	70.000
Vanadium	70.000
Uran	3.000

På grundlag af atmosfæriske spredningsmodeller kan man beregne den forøgelse af luftforureningen, som et kul- eller oliefyret værk giver anledning til. Man ved, at stoffer som svovldioxid og kvælstofoxider kan fremkalde eller forværre luftvejssygdomme samt hjerte- og kredsløbssygdomme. Man ved også, at de kan fremkalde mutationer, og hermed foreligger muligheden for kræft og arvelige ændringer. En polycyklisk kulbrinte som benzpyren, der også afgives med røggassen i mindre mængder, er stærk cancerogen.

Man kan imidlertid ikke identificere ofrene for den forøgede luftforurening, da der i forvejen af andre årsager forekommer mange flere sygdomstilfælde af samme art. Antallet kan kun beregnes, ved at man gennem såkaldte epidemiologiske undersøgelser skaffer sig et statistisk materiale, der kan benyttes til at bestemme sammenhængen mellem graden af forøget luftforure-

ning og forøgelsen af sygelighed og dødelighed. Sådanne undersøgelser er vanskelige at udføre - navnlig er det vanskeligt at eliminere de mange mulige fejlkilder. Der er derfor kun udført få anvendelige undersøgelser af denne art.

De to mest kendte og benyttede stammer fra U.S.A., hvor Lave og Seskin (ref. 1) har sammenlignet luftforureningsniveauer og dødelighed i 117 forskellige byer, og Winkelstein (ref. 2) har på tilsvarende måde sammenlignet forskellige distrikter i byen Buffalo. Disse undersøgelser er af Hamilton (ref. 3) benyttet til beregning af den forøgelse af antallet af dødsfald, som driften af et 1000 MW(e) kul- eller oliefyret værk må forventes at give anledning til (se tabel 2). Som det ses er beregningerne gennemført under forskellige teknologiske og befolkningsmæssige forudsætninger. Det ses også, at usikkerheden i bedømmelsen er meget stor. Nøjagtigere vurderinger må afvente, at vi opnår større indsigt i hvilke mekanismer, der fremkalder skaderne, hvorledes de enkelte komponenter i luftforureningen virker hver for sig og i kombination.

Opsummeringen af dødsfald i tabel 2 er af modeltekniske årsager kun foretaget ud til en afstand af 80 km fra værket. Forureningen vil i virkeligheden spredes over et meget større område, og skønsmæssigt bliver det totale antal for tidlige dødsfald ca. 3 gange større end det i tabel 2 angivne.

I beregningerne har man benyttet samme forudsætning, som anvendes ved beregning af strålingsskader, nemlig at der er proportionalitet mellem dosis og virkning. Da vi betragter virkningen af små tilskud til luftforureningsniveauer, der ligger tæt på klinisk effektive doser, er fejlen i denne antagelse sandsynligvis mindre for luftforurening end for strålingsforurening, hvor der er tale om doser, som inklusive den naturlige baggrundsstråling ligger langt under niveauer, hvor epidemiologiske eller kliniske virkninger kan lagttages. Selvom der ikke er linearitet mellem dosis og virkning, er det sandsynligt, at det forureningsniveauområde, vi betragter, ikke falder langt uden for den lineære del af kurven.

I tabel 3, som også er hentet fra Hamiltons arbejde (ref. 3), er der foretaget en samlet opgørelse af det forventede antal ekstra dødsfald i U.S.A. i år 2000 som følge af kulminedrift, transport, arbejdsulykker og luftforurening, hvis man til den tid har 320 kulfyrede kraftværker à 1000 MW(e) i drift (altså ikke flere atomkraftværker). Tallet ligger mellem 2.300 og 29.000 pr. år. Det er af samme størrelsesorden, som det den såkaldte Rasmussen rapport har beregnet for et stort reaktoruheld under ugunstige omständigheder. Forskellen ligger i sandsynligheden. Dødsfaldene fra 320 kulfyrede værker vil indtræffe hvert år, år ud og år ind, medens de for et

Table 2

EXCESS MORTALITY DUE TO AIR POLLUTION EXPOSURE FROM 1000 MWE FOSSIL FUEL POWER PLANT WITHIN 80 KM (305 M STACK HEIGHT, 75% CAPACITY FACTOR)

	Number of annual excess deaths				
	Lower 10%	*Lave Median	Upper 10%	*Winkelstein Linear	Non- Linear
<u>Eastern high sulfur coal</u>					
(2.9 x 10 ⁷ J/kg coal, 3% sulfur)					
(1.25 x 10 ⁶ BTU/£)					
<u>No sulfur removal</u>					
3x10 ⁶ people w/in 80 km	0	20	100	130	450
0.7x10 ⁶ people w/in 80 km	0	4.6	23	31	105
<u>90% sulfur removal</u>					
3x10 ⁶ people	0	2	10	13	45
0.7x10 ⁶ people	0	0.5	2.3	3.1	11
<u>Eastern low sulfur coal</u>					
(2.9 x 10 ⁷ J/kg, 0.4% sulfur)					
(1.2 x 10 ⁶ BTU/£)					
<u>No sulfur removal</u>					
3x10 ⁶ people	0	2.7	13	18	60
0.7x10 ⁶ people	0	0.6	3.1	4.1	14
<u>Montana coal</u>					
(2.1 x 10 ⁷ J/kg, 0.8% sulfur)					
<u>No sulfur removal</u>					
3x10 ⁶ people	0	7.3	37	49	170
0.7x10 ⁶ people	0	1.7	8.6	11	39
<u>High sulfur oil</u>					
(4.6 x 10 ⁷ J/kg, 2.5% sulfur)					
(2 x 10 ⁶ BTU/£)					
<u>No sulfur removal</u>					
3x10 ⁶ people	0	10.4	52	70	236
0.7x10 ⁶ people	0	2.4	12.2	16	55
<u>Low sulfur oil</u>					
(4.6 x 10 ⁷ J/kg, 0.2% sulfur)					
(2 x 10 ⁶ BTU/£)					
<u>No sulfur removal</u>					
3x10 ⁶ people	0	0.8	4.2	5.6	19
0.7x10 ⁶ people	0	0.2	1.0	1.3	4.4

* Modified from data of Lave and Winkelstein. For technical details, see Reference 8

320 PLANTS ASSIGNED AMONG REGIONS BY RELATIVE POPULATION INCREASE 1970-200

Region	1970-2000 Pop Increase		Number Of Plants Assigned	Yr. 2000 Total Annual Excess Deaths*				
	10 ⁶	%		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
NE	3.116	26	17.9	72	203	722	947	3022
MA	8.505	23	49	163	663	2531	3315	10849
ENC	9.88	24	56.8	148	373	1268	1620	5212
WNC	2.169	13	12.5	1.4	2.8	7.1	10	30
SA	13.618	43	78.4	303	617	1906	2466	7399
ESC	3.483	26	20	45	66	154	189	529
WSC	4.197	21	24.2	108	132	228	269	673
MT	2.539	29	14.6	1.9	5.7	17	21	68
PAC	8.089	30	46.6	248	205	418	473	1029
TOTAL	55.596		320	1090	2348	7251	9310	28811

* See Table 4 for explanation of the basis of each estimate.

Exposed population assumed to increase in proportion to increase in census region as a whole.

tilsvarende antal atomkraftværker vil indtræffe med en sandsynlighed på af størrelsesordenen 1 gang pr. million år. Langt den største del af de ekstra dødsfald skyldes luftforureningen, således som det fremgår af tabel 4 (ref. 4).

Uran

Ligesom for kul og olie er helbredsskaderne fra de første led i brændselskredsløbet, minedrift og transport, forholdsvis lette at gøre op. Ofrene kan identificeres og tælles. Arbejdsulykkerne på atomkraftværker og oprensningsanlæg volder heller ingen vanskeligheder. Det er igen antallet af sygdomstilfælde og dødsfald på grund af luftforureningen, som er vanskeligt at bedømme, fordi man ikke kan identificere ofrene, da der i forvejen af andre grunde forekommer et langt større antal sygdomstilfælde af samme art.

Af de radioaktive stoffer, der fra et atomkraftværk afgives til atmosfæren, er ædelgasserne krypton og xenon samt jod de vigtigste. Mængderne er små sammenlignet f.eks. med de ca. 100 kg radioaktivt uran med radioaktive datterprodukter, der årligt udsendes gennem skorstenen fra et 1000 MW(e) kulfyret værk - det drejer sig om mængder fra mikrogram til ca. 100 g pr. år. De radioaktive stoffer, der udsendes fra et atomkraftværk, har imidlertid en meget kortere levetid end uran, og strålingen er derfor meget mere intens. Alt taget i betragtning bliver de strålingsmæssige virkninger fra anvendelsen af kul og uran nogenlunde de samme. Der er dog forskere, som mener, at strålingsdoserne fra et kulfyret værk er 10-100 gange større end fra et atomkraftværk.

På grundlag af atmosfæriske spredningsmodeller er det forholdsvis let at beregne koncentrationerne af radioaktive stoffer i omegnen af et atomkraftværk på samme måde, som man kan beregne luftforureningen fra et kulfyret eller oliefyret værk. Det er imidlertid vanskeligere at beregne doserne, fordi strålingen virker på afstand, og man må derfor foretage en rumlig integration for hvert sted. Med moderne EDB-teknik lader beregningerne sig dog gennemføre. Den virkelige vanskelighed viser sig først, når doserne skal omregnes til helbredsmæssige skader.

Man ved fra atombombningerne af Hiroshima og Nagasaki og fra behandling af patienter med røntgenstråling, at meget store doser givet i løbet af kort tid kan fremkalde forskellige kræftsygdomme. Man ved også fra dyreforsøg, at sådanne doser kan give anledning til arvelige ændringer og sygdomme. Det drejer sig om doser af størrelsesordenen 100 rad ^{*)}. Strålingen fra atom-

^{*)} rad er en måleenhed for den strålingsenergi, som afsættes i et materiale f.eks. levende væv.

Table 4

COAL	EXCESS MORTALITY per 0.0 GWy(e)				
<u>FUEL CYCLE COMPONENT</u>	<u>OCCUPATIONAL</u>		<u>GENERAL PUBLIC</u>		<u>TOTAL</u>
	<u>ACCIDENT</u>	<u>DISEASE</u>	<u>ACCIDENT</u>	<u>DISEASE</u>	
RESOURCE RECOVERY (Mining, Drilling, etc.)	0.3-0.6	0-7	*	*	
PROCESSING	0.04	*	*	10	
POWER GENERATION	0.01	*	*	3-100	
FUEL STORAGE	*	*	*	*	
TRANSPORTATION	*	*	1.2	*	
WASTE MANAGEMENT	*	*	*	*	
TOTAL	0.35-0.65	0-7	1.2	13-110	15-120

Ref. 1

*The effects associated with these activities are not known at this time. While such effects are generally believed to be small, they would increase the totals in this column.

kraftværker giver imidlertid kun et lille tilskud til den naturlige baggrundsstråling, der ligger omkring 100 millirad pr. år. Vi har ingen mulighed for klinisk eller epidemiologisk at konstatere nogensomhelst skadevirkning af så lave doser og dosishastigheder. Det eneste, vi på nuværende tidspunkt kan gøre, er at ekstrapolere lineært fra de store doser og dosishastigheder, hvor virkninger er konstateret, til meget små doser og dosishastigheder. Det er en ekstrapolation over mange dekader, og den er derfor temmelig dristig, men for at være på den sikre side regner vi med linearitet. Det var samme antagelse, vi gjorde for olie- og kulfyrede værker, men her var ekstrapolationsområdet formentlig ikke mere end 1 dekade.

I tabel 5 (ref. 4) er antallet af forventede ekstra dødsfald på grund af 1 års drift af et 1000 MW(e) atomkraftværk gjort op, således at man kan se, hvorledes de er fordelt på brændselskredsløbets forskellige komponenter, på erhvervsmæssigt beskæftigede og den almindelige befolkning, og om de skyldes ulykker eller sygdom. Det er værd at bemærke, at det samlede antal (0,47) er mindre end antallet af dræbte i den almindelige befolkning (1,2) alene på grund af trafikuheld i forbindelse med kultransport til et kulfyret værk af samme størrelse (se tabel 4). Den største del af dødsfaldene indtræffer blandt de erhvervsmæssigt beskæftigede, og her er det arbejdsulykkerne i forbindelse med minedrift, som bærer hovedansvaret.

Ti forskellige energiteknologier

Som nævnt i det foregående bør alle led i en energiproduktion tages i betragtning ved bedømmelse af dens helbredsmæssige konsekvenser. Det har vi ikke gjort helt til bunds i det foregående. Vi har nemlig ikke medtaget arbejdsulykker og sygdom og dødsfald, som følge af fremstilling af materialer og arbejdsindsats i forbindelse med bygning af de nødvendige anlæg.

Det bliver særlig vigtigt at medtage disse ting, når det drejer sig om såkaldte vedvarende energikilder. Det fremgår af fig. 1 (ref. 5), hvor materialeforbrug og arbejdsindsats pr. MW år til opførelse af anlæg er vist for 10 forskellige energiteknologier. Bemærk at skalaen er logaritmisk.

Hvad er grunden til den store materiale- og arbejdsindsats pr. energienhed for de vedvarende energikilder sammenlignet med kul, olie, naturgas og uran? Det er, at de sidstnævnte er koncentrerede energiformer, medens energitætheden i vedvarende energikilder som sol og vind er lille, og de er ikke altid til rådighed, netop når man har brug for dem. Derfor kræves der uforholdsmæssigt store opsamlings- og lagringssystemer pr. energienhed. Resultatet af en analyse med hensyn til ekstra dødsfald, hvor disse forhold er taget med i betragtning (ref. 5) fremgår af fig. 2. Bemærk at skalaen er

Tabel 5

NUCLEAR EXCESS MORTALITY per 0.8 GWy(e)					
<u>FUEL CYCLE COMPONENT</u>	<u>OCCUPATIONAL</u>		<u>GENERAL PUBLIC</u>		<u>TOTAL</u>
	<u>ACCIDENT</u> (a)	<u>DISEASE</u> (b,c,d,)	<u>ACCIDENT</u> (d,e,)	<u>DISEASE</u> (b)	
RESOURCE RECOVERY (Mining, Drilling, etc.)	0.2	0.038	~0	+	
PROCESSING (f)	0.005**	0.042	*	0.002	
POWER GENERATION	0.01	0.061	0.04	0.011	
FUEL STORAGE	*	~0	*	~0	
TRANSPORTATION	~0	~0	0.01	~0	
REPROCESSING	*	0.003	*	0.050	
WASTE MANAGEMENT	*	~0	*	0.001	
TOTAL	0.22	0.14	0.05	0.064	0.47

*These effects are not included in Table S-3, 10 CFR 51. Ref. 7 would indicate about 0.023 excess deaths per 0.8 GWy(e) due to radon-222 emission.

* The effects associated with these activities are not known at this time. While such effects are generally believed to be small, they would increase the totals in this column.

**Corrected for factor of 10 error based on referenced value (WASH-1250)

(a) Ref. 1

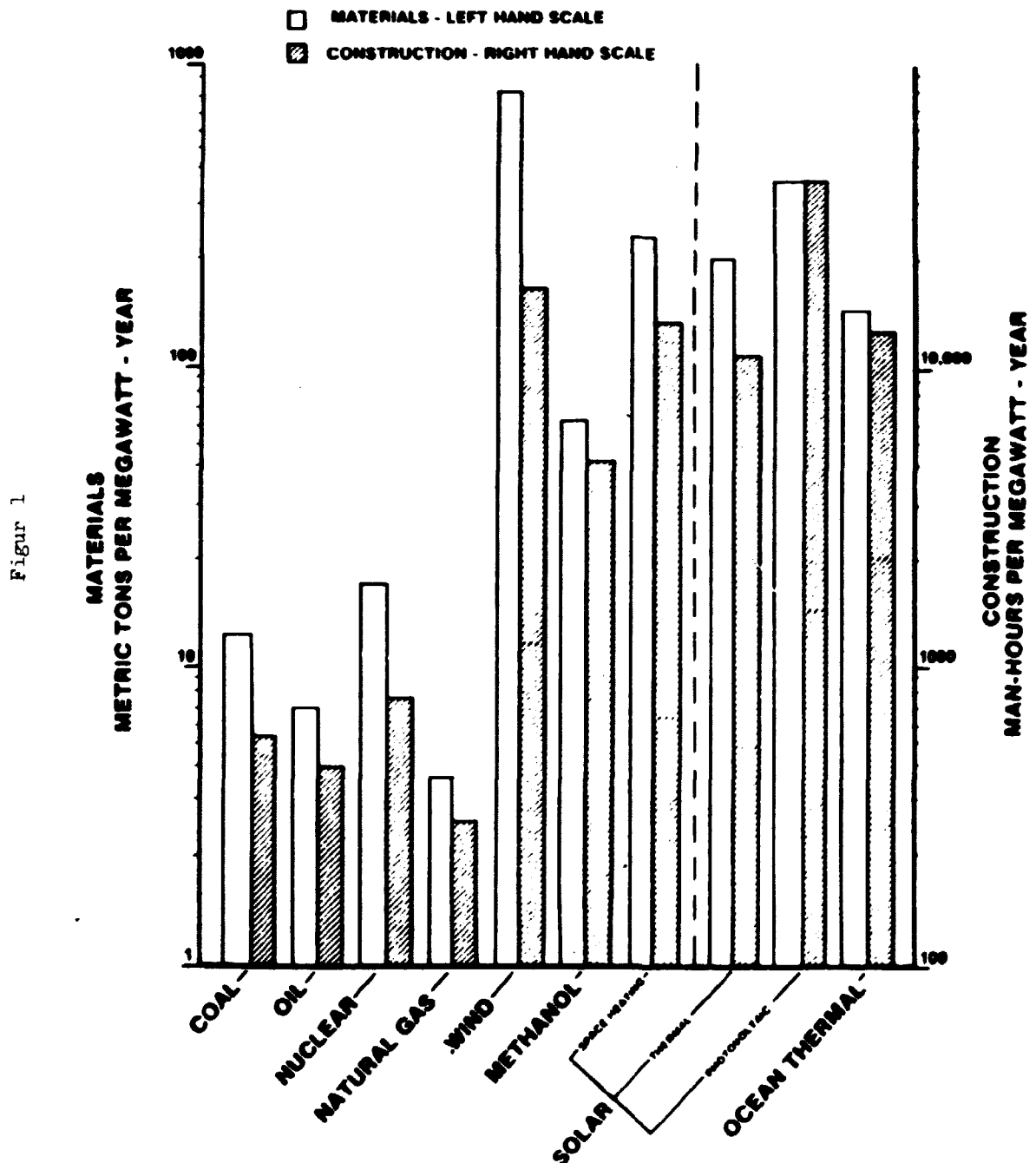
(b) Ref. 7

(c) 10 CFR 51, Table S-3

(d) 10 CFR 51, Table S-4

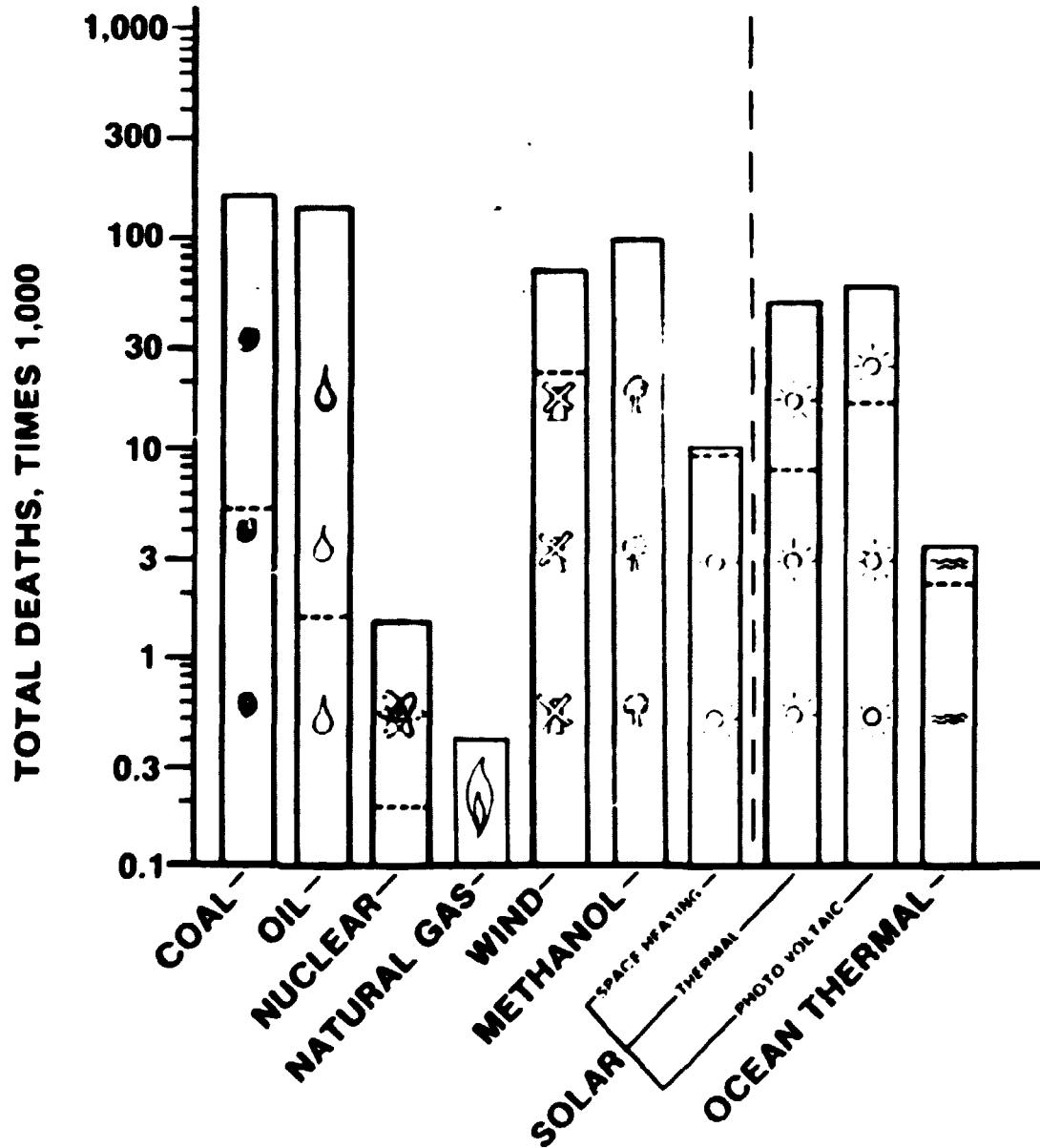
(e) Ref. 8

(f) Includes milling, uranium hexafluoride production, uranium enrichment, and fuel fabrication.



Summary of Material Acquisition and Construction Requirements. Both material and construction time requirements are greater for non-conventional systems as compared to conventional systems. Natural gas has the lowest requirements of both types. Windpower has the highest material requirements, and solar photovoltaic the highest construction times. The ratio between the highest and lowest values in each category is between 100 and 200.

Figure 2



Total Deaths, times 1000, per Megawatt-year as a Function of Energy System (see explanation in caption to Figure 9). For this graph, the public and occupational deaths are combined. Natural gas power has the lowest value, followed by nuclear. Most other non-conventional technologies have risk comparable to coal and oil.

logaritmisk. Det ses, at naturgas (anvendt til elektricitetsproduktion) har det laveste risikotal tæt fulgt af uran. Kul og olie ligger højest, men vind- og solenergi er ikke stort bedre, når det drejer sig om elektricitetsproduktion, medens solenergi til rumopvarmning indtager en mellemposition.

Afsluttende bemærkninger

De risikotal, som er præsenteret i dette foredrag, dækker kun virkninger, som manifesterer sig i løbet af en årrække svarende til en generation efter frigørelsen af de forurenende stoffer. Set på meget langt sigt kan virkningerne blive større, da en del af de frigivne stoffer ikke nedbrydes. Det gælder f.eks. de stoffer, der er nævnt i tabel 1 - i praksis inklusive uran, som i modsætning til de radioaktive stoffer, der afgives fra et kernekraftværk, har en meget lang levetid (halveringstiden er ca. 4 1/2 milliard år). Uranet i flyveasken fra kulfyrede værker vil i hele sin levetid fortsætte med at producere den radioaktive ædelgasart radon, hvorefter en del vil afgives til atmosfæren. Det samme gælder uranresterne i affaldsbunkerne ved uranminerne. Skaderne fra de ikke-nedbrydelige stoffer og radon er små, hvis man kun betragter en begrænset årrække, men summerer man over resten af menneskehedens eksistens, får man en meget stor sum. Det er et uafgjort spørgsmål, hvorledes disse skader skal behandles i en cost-benefit analyse. Vanskeligheden består i, at omkostningerne ved en reduktion af frigivelserne skal betales nu, medens udbyttet i form af en reduktion af de helbreds-mæssige virkninger først opsummeres gennem millioner af år (ref. 6).

Et specielt problem i forbindelse med kul-, olie- og gasfyrede værker, som også bør nævnes, er den såkaldte drivhuseffekt. Et 1000 MW(e) kulfyret værk afgiver årligt mellem 7,5 og 10,5 millioner tons kuldioxid til atmosfæren. Fortsætter vi med at forege afbrændingen af fossile brændsler, kan det give anledning til en forøgelse af atmosfærens temperatur, da kuldioxid absorberer stærkt i den infrarøde del af spektret. Nogle forskere mener, at det allerede tilføjet i næste århundrede kan medføre så store temperaturstigninger (flere °C) at polarisen begynder at smelte, således at mange beboede områder i verden vil blive oversvømmet. Samtidig skulle det kunne resultere i tørke i de tempererede zoners landbrugsområder med hungersnød til følge.

Referencer

1. L.B. Lave og E.P. Seskin, "An analysis of the association between U.S. mortality and air pollution", J. Am. Stat. Assoc. 68, 284-290, 1973.
2. W. Winkelstein, S. Kantor, E.W. Davis, C.S. Maneri og W.E. Mosher, "The relationship of air pollution and economic status to total mortality and selected respiratory system mortality in men", Arch. Environ. Health 14, 162-171, januar 1967.
3. L.D. Hamilton og A.S. Manne, "Health and economic cost of alternative energy sources", IAEA-CN-36/448, Wien 1977.
4. R.L. Gotchy, "Health effects attributable to coal and nuclear fuel cycle alternatives", NUREG-0332, 1977.
5. Herbert Inhaber: "Risk of energy production", AECS 1119, 1978.
6. H.L. Gjerup, "Global collective dose commitments from release of long-lived radionuclides - differential cost-benefit considerations", IAEA-CN-36/205, Wien 1977.

C. VVS-REAKTORSYSTEMER OG KVALITETSSIKRING

F. List

Udnyttelse af atomenergi er baseret på en kædeproces af fissioner (spaltninger af tunge atomkerner) formidlet ved hjælp af neutroner. Ved fission af 1 kg fissilt materiale udvikles en lige så stor varmemængde, som svarer til forbrænding af 3000 t kul, samtidig med, at der dannes 1 kg radioaktive fissionsprodukter. Prisen for at udnytte atomenergien er altså, at menneskene skal tage vare på disse fissionsprodukter, hvoraf nogle vil være radioaktive i flere hundrede år.

Man har altid været opmærksom på risikomomenterne, så man har straks fra starten indført sikkerhedsforanstaltninger og efterhånden udbygget disse og udført uheldsanalyser og risikoberegninger i et omfang, som aldrig før er set inden for teknikken. Resultatet er da også blevet en enestående høj grad af sikkerhed såvel for de ansatte inden for atomkraftindustrien som for den øvrige befolkning. Således er endnu intet menneske kommet alvorligt til skade som følge af strålingsulykke på et kommercielt atomkraftværk, efter at man har opnået erfaringer svarende til, at 160 sådanne værker hver har været i drift i 10 år.

Generelt kan man sige, at sikkerhedsforanstaltningerne skal:

1. Forhindre at unormale driftssituationer opstår (anvendelse af stor omhu under projektering, bygning, kontrol og drift. (Kvalitetssikring)).
2. Beskytte anlæg og personale, hvis unormale driftssituationer alligevel skulle opstå (automatisk indgreb, dublering af vigtige komponenter og systemer).
3. Formindske følgerne af værste trolige uheld (installation af nødkølesystemer, anvendelse af en gastæt reaktorindeslutning).

Princippet er det, at man beskytter sig ved hjælp af en række bag hinanden liggende "forsvarsbarrierer" (forsvar i dybden).

a. Atomkraftværk med kogendevandsreaktor

I det følgende skal gives en kort omtale af et anlæg med en kogendevandsreaktor af amerikansk konstruktion.

Reaktorkernen er opbygget af et antal ens brændselselementer (fig. 1 og 2), som hver består af et knippe af brændselsstave omgivet af et firkantet hylster. En brændselsstav består af et ca. 4 m langt zircaloy-rør (udvendig diameter 12,5 mm) fyldt med cylindriske piller af urandioxid (2-3% beriget) og lukket i begge ender med tilsvejste endepropper, således at fissionsprodukterne ikke kan slippe ud i kølevandet. Under drift vil varmeproduktionen ved fissionsprocesserne få pillerne til at gløde, og varmen ledes ud gennem rørvæggen, hvorved vandet kommer i kog. Brændselsstavene holdes på plads af en bundrist og en toprist samt af afstandsholdere jævnt fordelt langs stavene mellem de to riste.

Kontrolstavene har korsformigt tværsnit, således at de kan anbringes mellem brændselselementerne og styres af deres hylstre. Hydrauliske drivmekanismer under reaktortanken kan bevæge kontrolstavene, som indeholder det neutronabsorberende stof borkarbid, op og ned.

Ved hjælp af en række strålepumper cirkuleres vandet gennem reaktorkernen, hvorved en del af vandet fordamper. Dampen strømmer gennem dampudskillere og tørrere, før den ledes til turbinen. Returvandet fra kondensatoren føres ind foroven i tanken og fordeles med en ringformet ledning. Trykket i tanken er 70 kg/cm^2 , hvilket svarer til en vandtemperatur på 285°C .

En gang om året stoppes driften, således at der kan ske udskiftning af ca. $1/4$ af brændselselementerne. Udskiftningen foregår på den måde, at man aftager reaktortankens dæksel og fylder tanken og et bassin over tanken med vand. Ved hjælp af en kran kan man løfte dampudskillere m.m. op, og derpå kan der ske udskiftning af brændselselementer. Under hele transporten holdes elementerne under vand, der både skal beskytte mod strålingen og køle de udbrændte elementer. Disse opbevares i et vandfyldt bassin for senere at blive sendt til et oparbejdningsanlæg. Her bliver elementerne opløst i syre, og ad kemisk vej adskilles uranet, det dannede plutonium og fissionsprodukterne. De to førstnævnte stoffer kan bruges igen, medens fissionsprodukterne udgør det egentlige højaktive affald.

Reaktoren er af sikkerhedshensyn anbragt i en gastæt reaktorindeslutning (fig. 3 og 4 (nyere udformning)). Ved brud på en rørledning vil vanddampblandingen strømme gennem en vandlås, hvorved dampen fortættes, hvilket bevirker en reduktion af trykket.

Reaktoranlæggets hjælpesystemer omfatter systemer, som er nødvendige under normal drift, og systemer, som skal træde i funktion under unormale forhold og i nødsituationer. Systemerne for normal drift omfatter bl.a. vandrensningssystemer til vedligeholdelse af høj renhedsgrad af reaktorvandet samt kølevandsystemer til køling af diverse komponenter.

Behovet for et antal systemer til unormale driftsforhold skyldes især, at der i reaktorkernen udvikles varme, selv længe efter at reaktoren er blevet nedlukket. Systemerne er skematisk vist på fig. 3 og omfatter:

- a. Reserve-kontrolsystem, som kan lukke reaktoren ned ved indpumpning af en boropløsning (neutronabsorber).
- b. System for køling af reaktorkernen ved afspærret reaktor. Dette system træder i funktion, når dampledningen afspærres. Dampen blæses ned i reaktorindeslutningens vandbassin, samtidig med at en pumpe, som suger fra dette bassin eller fra en kondensattank, sender vand tilbage til reaktortanken gennem fødevandsledningen. Vandet i bassinet kan holdes under en vis temperatur ved hjælp af et bassinkølesystem.
- c. Nødkølesystemer, som automatisk skal træde i funktion og sikre køling af reaktorkernen i tilfælde af brud på det primære kølesystem. Af sikkerhedshensyn anvendes tre af hinanden uafhængige systemer, nemlig et HT-system og to LT-systemer. HT-systemet, som anvendes ved mindre brud, er i stand til at pumpe vand ind i tanken under normalt driftstryk. De to LT-systemer, som træder i funktion, når reaktortrykket er faldet under en vis værdi, suger fra reaktorindeslutningens bassin og sender vand ind i tanken gennem en cirkulationsledning eller gennem et arrangement af brusere over reaktorkernen. Ved hjælp af dette kan brændselementerne overbruses i tilfælde af, at de tørlægges.
- d. System for køling af reaktorkernen ved nedlukket reaktor. Reaktorvandet tages ud ved sugesiden af en cirkulationspumpe, sendes gennem en køler og returneres til tryksiden. Dette system

hører egentlig hjemme under systemer for normal drift; men har komponenter fælles med et nødkølesystem.

e. Afbløsningssystemet anvendes til afblæsning af reaktor-trykket ved mindre brud, således at LT-systemerne kan sættes i funktion om nødvendigt. Trykket afblæses gennem en sikkerhedsventil ned i reaktorindeslutningens bassin.

Kontrol- og sikkerhedsinstrumenteringen regulerer værkets opstart, drift og nedlukning samt yder beskyttelse for personale og anlæg. Instrumenteringens funktion er bl.a. at lukke reaktoren ned i tilfælde af driftstilstand, som kan føre til en farlig situation, og at overvåge radioaktiviteten forskellige steder på anlægget og give alarm, hvis den stiger over det tilladelige.

Størsteparten af de radioaktive stoffer findes i brændselementerne og føres altså bort, når disse sendes til oparbejdningsanlæg. Under den daglige drift produceres dog svagt radioaktivt affald af forskellig art (gasarter fra kondensatorudsugning, spildevand, filtre m.m.). Der findes på værket udstyr til at behandle og opbevare dette affald og sikre, at der ikke afgives større mængder af radioaktive stoffer til omgivelserne, end hvad der er tilladt af myndighederne.

Reaktorindeslutningen er forsynet med et ventilationsanlæg bestående af en række delsystemer (fig. 4).

Indblæsningsventilatorer sender frisk, tempereret luft via luftbehandlingsanlæg ind i reaktorindeslutningen. Trykket i denne holdes på 6,5 mm v.s. under atmosfæretryk. Udblæsningsluften bliver målt for radioaktivitet, og ved stigning i aktivitetsniveauet sendes luften gennem et rensningsanlæg bestående af fugtudskiller, el-varmere og diverse typer af filtre.

Luften i tørbrønden kan udskiftes en gang pr. time. I tilfælde af radioaktivitet i luften vil den blive sendt til luftrensningsanlægget, der også benyttes, hvis tørbrønden skal gøres tilgængelig for personalet, når værket er taget ud af drift for eftersyn. Køling af luften i tørbrønden sker ved hjælp af en række køleenheder med cirkulationsventilatorer. På samme måde køles også luften i reaktorindeslutningen. Systemerne er beregnet til at holde en temperatur på 57°C i tørbrønden og 32°C i reaktorindeslutningen under normal drift. Under toppen af reaktorindeslutningen er anbragt recirkulationsventilatorer, der skal forhindre, at der dannes lommer af gas og varm luft.

Rummet mellem afskærmningsbygningen og reaktorindeslutningen er forsynet med et ventilationssystem, der kan holde trykket på 125 mm v.s. under atmosfæretryk. Hvis radioaktivitetsniveauet bliver for højt, eller hvis der sker uheld med reaktoren, kobles systemet til luftrensingsanlægget. Et trykudligningssystem sørger for, at trykket i reaktorindeslutningen ikke bliver lavere end trykket i mellemrummet.

b. Kvalitetssikring

Ved kvalitetssikring (Quality Assurance) forstås alle de planlagte og systematiske aktioner, der er nødvendige for at man kan få tilstrækkelig tiltro til, at systemer og komponenter vil virke tilfredsstillende under brug. Man kan også sige det på den måde, at kvaliteten skal være i orden, og at man skal sikre sig, at kvaliteten er i orden.

Kvalitetssikring anvendes på alle de aktiviteter, der er forbundet med konstruktion, bygning og drift af atomkraftværker med det formål at reducere risikoen for, at værket skal gøre skade på befolkning og miljø. Det er ejeren af værket, der er ansvarlig for, at der etableres og udføres et kvalitetssikringsprogram.

Unormal opførsel af et system eller en komponent opstår som følge af fejl opstået under konstruktion, bygning eller drift af anlægget. En fejl kan fremkomme som følge af utilstrækkelig teknisk kunnen eller forkert betjening. Formålet med kvalitetssikring er at tage sig af disse fejl, og det kan man gøre ved at:

- 1) lære at leve med dem
- 2) forhindre dem
- 3) opdage dem og foretage korrektioner.

Da ingen af disse metoder kan klare fejlene alene, må man anvende dem alle tre. Med hensyn til pkt. 1 kan man anvende passende sikkerheder ved fastsættelsen af tilladelige spændinger, udføre pålidelighedsanalyser og dublere vigtige systemer og komponenter. Vedrørende pkt. 2 kan man opbygge et administrativt system, som forøger pålideligheden af den menneskelige indsats. Det kan bl.a. ske ved, at man udarbejder specifikationer, som trin for trin beskriver, hvorledes arbejdet skal udføres.

Vedrørende pkt. 3 kan fejl findes både før og efter, at et anlæg er sat i drift. Inden idriftsættelsen sker det bl.a. ved anvendelse af matematiske og fysiske modeller, kontrol af specifikationer, tegninger og beregninger, analyse af materialer, kontrol af komponenter m.m. Efter idriftsættelse må man tage hensyn til slid, ældningsfænomener, mulig misbrug eller andet, som kan forøge risikoen for fejl. Det er derfor nødvendigt med regelmæssige eftersyn og kontrolforanstaltninger, så længe anlægget er i drift.

Det er særligt USA, der har været foregangsland med hensyn til anvendelse og standardisering af kvalitetssikring. I den amerikanske standard er opstillet regler for bl.a. organisering af kvalitetssikringsprogram, ansvarsfordeling, kommunikation og dokumentation. Hertil kommer regler for de mange forskellige kontrolforanstaltninger i forbindelse med konstruktion, fremstilling og drift af anlægget.

Ud fra den sikkerhedsmæssige betydning, de enkelte komponenter og systemer har, inddeles de i forskellige sikkerhedsklasser, og kravene til kvalitetsniveauet afhænger så af, hvilken sikkerhedsklasse komponenten eller systemet tilhører.

Et kvalitetssikringsprogram resulterer bl.a. i et enormt papirarbejde. Det har været nævnt, at de nødvendige papirer i forbindelse med bygning af et amerikansk atomkraftværk ialt vejede 78 tons.

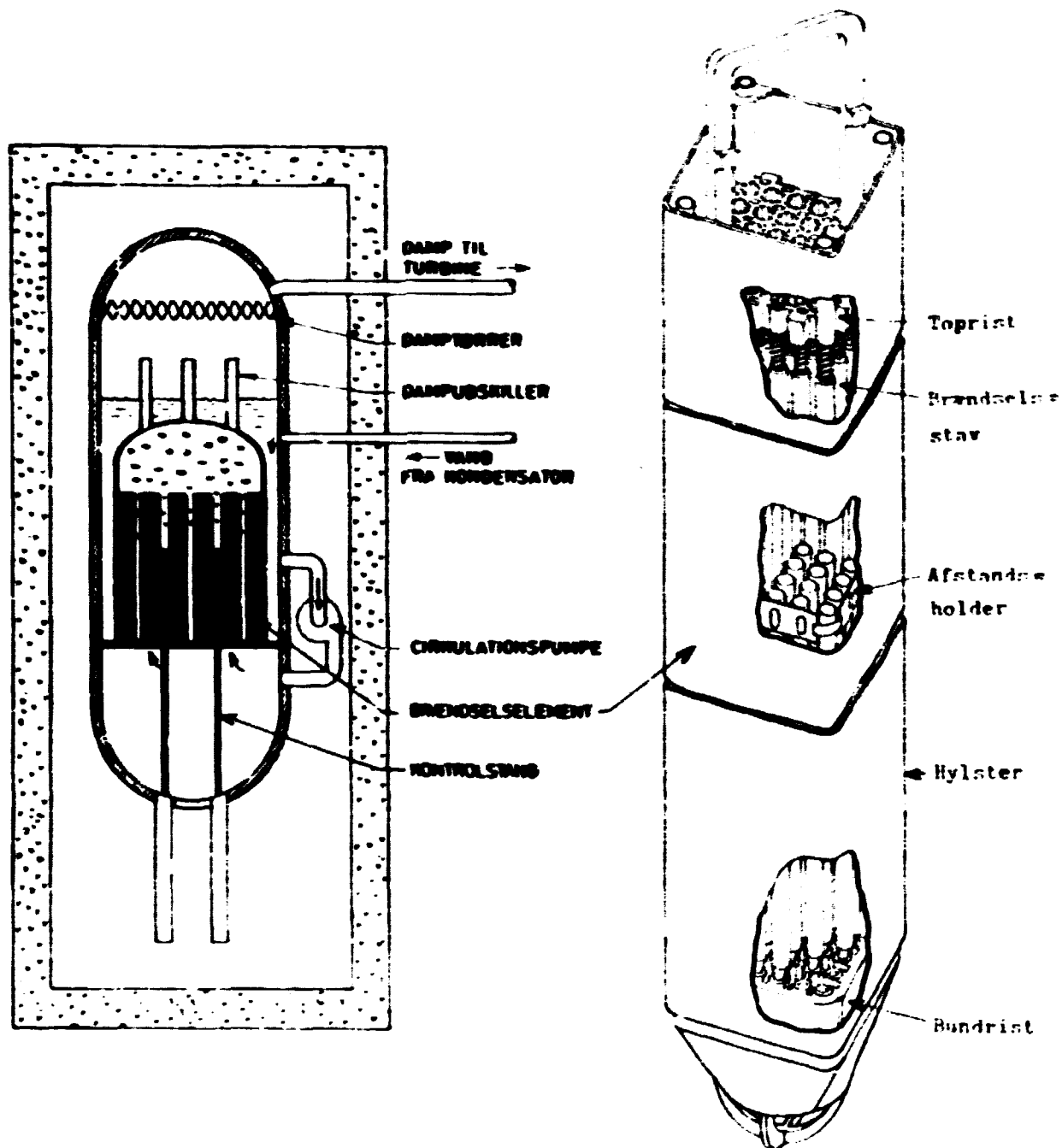


Fig. 1. Kogendevandsreaktor

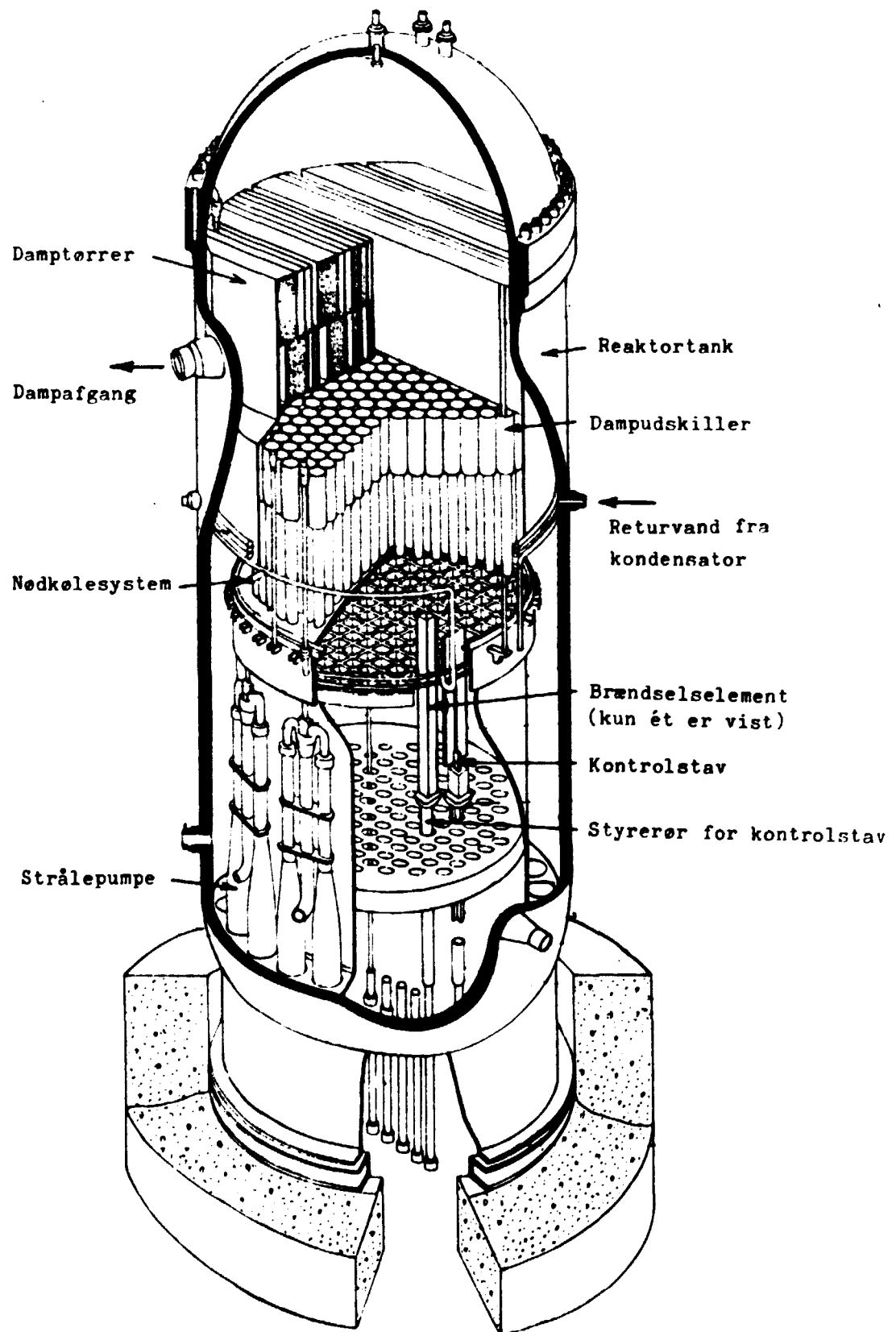


Fig. 2. Kogendevandsreaktor

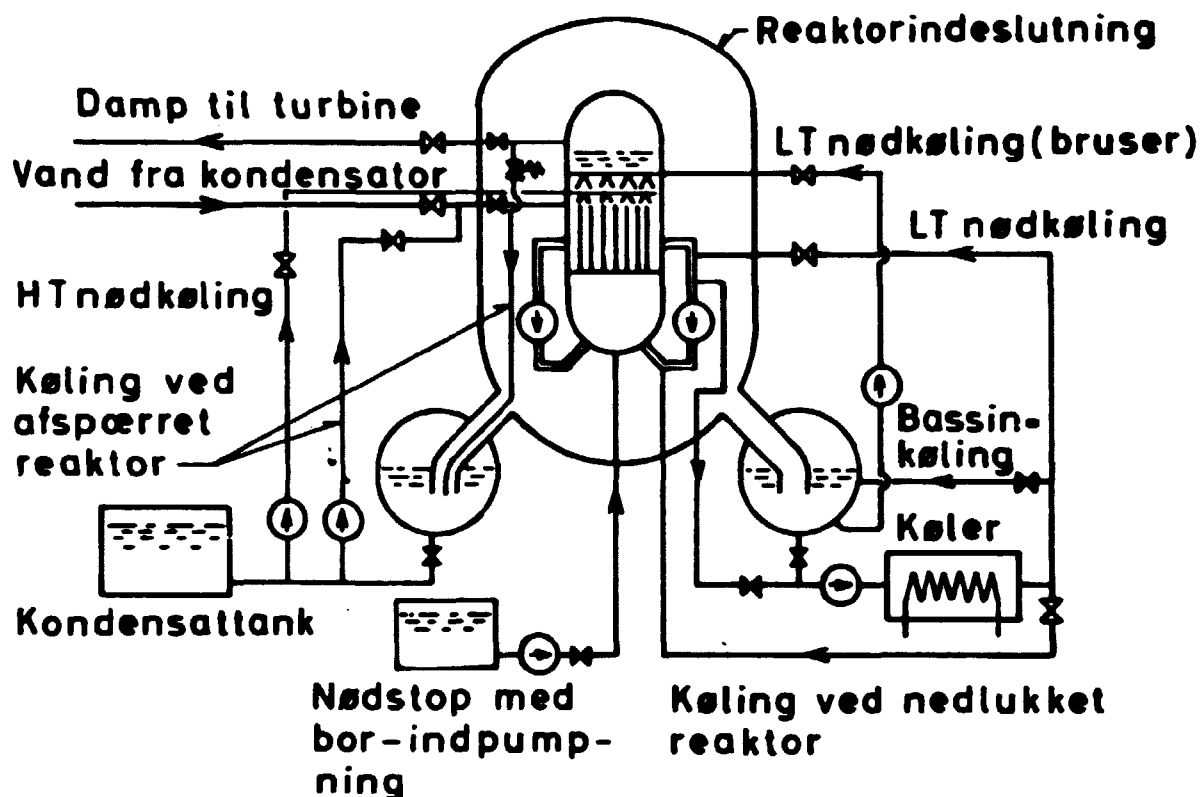


Fig. 3. Hjelpesystemer ved en kogendevandsreaktor

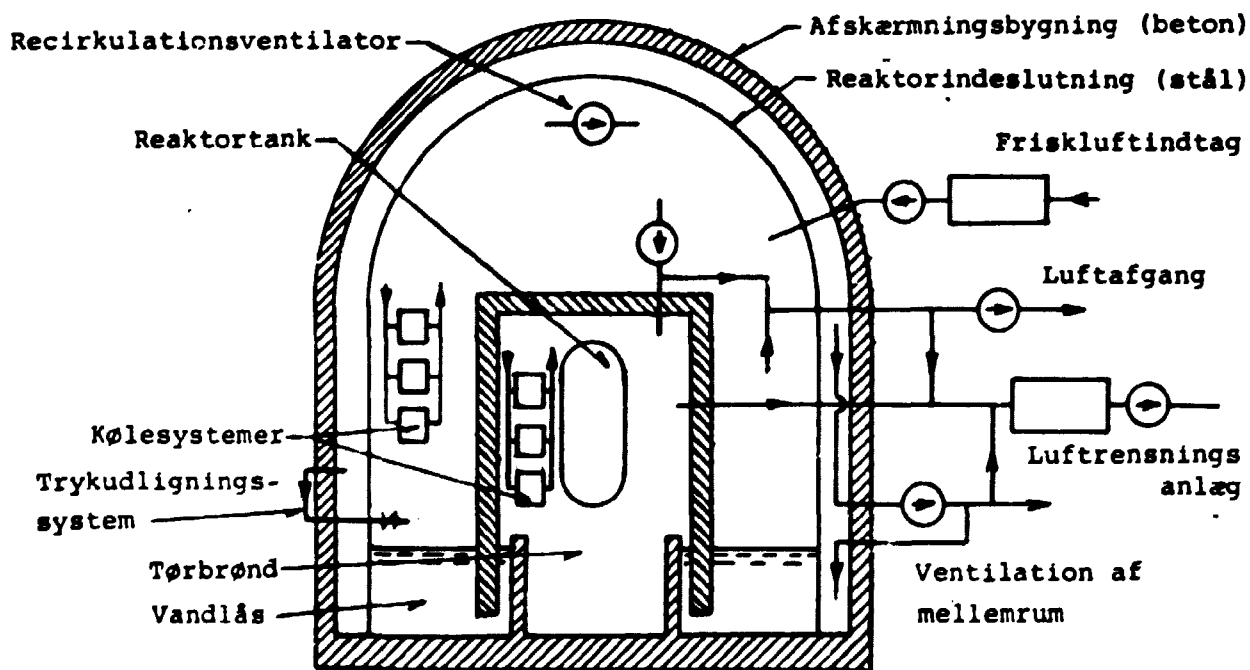


Fig.4 Ventilationsanlæg

D. RADIOAKTIVT AFFALD, DETS OPSTÅEN OG OPLAGRING.

K. Brodersen

1. Brændselskredsløbet
 - 1.1. Uranminer
 - 1.2. Uranberigning
 - 1.3. Brændselselementfremstilling
 - 1.4. Reaktoren
 - 1.5. Oparbejdning af brugt brændsel
 - 1.6. Deponering af højaktivt affald
2. Reaktordrift
 - 2.1. Rensningssystemer
 - 2.2. Behandling og deponering af reaktoraffald
3. Nedlagte nukleare anlæg.

1. BRÆNDSLSKREDSLØBET

For at kunne udnytte atomkraft til fremstilling af energi kræves der dels reaktorer, hvori de nukleare processer kan gennemføres på kontrolleret vis, så den dannede varme kan nyttiggøres, og dels en kæde af proces- og fabriktionsanlæg, der forsyner reaktoren med det nødvendige brændsel. Såvel i reaktoren som i de øvrige anlæg, der indgår i det såkaldte brændselskredsløb, vil der fremkomme affaldsprodukter, der er mere eller mindre forurenet med radioaktive stoffer. De vigtigste led i brændselskredsløbet er i rækkefølge: Uranminer, uranberigning, brændselselementfabrikation, reaktorer, oparbejdning af brugt brændsel samt deponeringsanlæg for affald. En oversigt over de involverede mængder ved 1 års drift af en stor reaktor er givet i fig. 1.

1.1. Uranminer

Naturligt uran udvindes af malmforekomster ved knusning og kemiske ekstraktionsprocesser. Affaldet fra uranudvinding består i den ekstraherede rest af knuste mineraler, såkaldte tailings, samt forskellige slamformige produkter fra den videre kemiske oparbejdning af den udvundne uranopløsning. Affaldet, hvorfra der ved fattige uranmalme dannes store mængder, henlægges i lighed med andet mineaffald i nærheden af eller evt. i selve mineanlægget. Affaldet vil indeholde lave koncentrationer af naturligt forekommende datterprodukter af uran som f.eks. radium. Udsivning af luftformig radon fra affaldet kan begrænses ved tildækning med jord o.l. Uranminedrift vil kunne komme på tale på Grønland.

1.2. Uranberigning

Mange reaktorer, f.eks. letvandsreaktorer af typen PWR eller BWR, kræver en forøgelse af indholdet af U-235 isotopen i uranet, inden dette kan anvendes som brændsel i reaktoren. Berigningen udføres ved at naturligt uran omdannes til luftformige uranfluoridforbindelser, der derefter pumpes gennem diffusions- eller centrifugeanlæg opbygget af et meget stort antal enheder. På grund af anlæggenes størrelse vil bygning af berigningsanlæg ikke kunne komme på tale i Danmark. Affaldsmængderne fra berigning er uden større

betydning så længe man forudsætter at kunne finde anvendelse for det forarmede uran, altså uran med lavt U-235 indhold, der jo også dannes ved processen. Forarmet uran kan anvendes som brændsel i formeringsreaktorer.

1.3. Brændselelementfabrikation

Det berigede uran omdannes til uranoxid, der presses til piller, som kommes i rør af en zirconiumlegering og samles til brændselelementer. Indholdet af radioaktive stoffer i affald fra denne form for elementfabrikation er uden betydning. Anderledes stiller det sig, hvis man fremstiller brændsel, hvor den nødvendige berigning er opnået ved opblanding af uranet med plutonium. I så fald vil man få en del plutonium-forurenset affald fra element-fremstillingen. Metoder til genvinding af plutonium fra sådant affald er under udvikling, men noget affald med lav aktivitet vil der altid blive til rest, hvis man går ind for tilbageføring af plutonium i brændselskredsløbet, hvad bl.a. ressourcemæssige hensyn kan tale for. Ved eksemplet i fig. 1 er der regnet med tilbageføring af plutonium.

1.4. Reaktoren

I reaktoren spaltes uran og plutonium under dannelse af varme, radioaktive fissionsprodukter og neutroner, der dels vedligeholder fissionsprocessen dels indfanges i uran under dannelse af plutonium og andre transuraner og dels indfanges i konstruktionsmaterialer og kølemidler med mere under dannelse af radioaktive såkaldte aktiveringsprodukter. Små mængder fissionsprodukter, især gasformige stoffer, kan undvige fra brændselet gennem små utætheder i element-beklædningen for derefter sammen med dele af aktiveringsprodukterne at blive transporteret rundt i reaktoren med det cirkulerende vand. Metoder til rensning af reaktorvand og håndtering af det affald, der opstår herved, gennemgås i afsnit 2. Langt hovedparten af de dannede fissionsprodukter og transuraner forbliver imidlertid indesluttet i brændselet og fjernes fra reaktoren, når brændselet efter 3-4 års brug ikke længere kan anvendes. På grund af henfaldet af en mængde kortlivede radioaktive isotoper udvikles der i perioden lige efter udtag af reaktoren en hel del varme i det brugte brændsel. Brændselet oplagres derefter midlertidigt i vandfyldte bassiner, hvor vandet

både tjener som kølemiddel og strålingsafskærmning. Efter oplagring i $\frac{1}{2}$ år eller mere vil det brugte brændsel uden vanskeligheder kunne transporteres i specialbyggede beholdere.

1.5. Oparbejdning af brugt brændsel

Beholderne med det brugte brændsel, der stadig er stærkt radioaktivt, sendes til et oparbejdningsanlæg (reprocessingsanlæg), der af økonomiske grunde i lighed med berigningsanlægget bygges til at betjene et stort antal reaktorer. Anlæggets størrelse sammenholdt med den beskedne brændselsmængde, der kan forventes fra et dansk reaktorsystem, udelukker, at oparbejdning vil kunne foretages her i landet.

På oparbejdningsanlægget klippes det brugte brændsel i små stykker, og indholdet af uforbrugt uran og dannede transuraner og fissionsprodukter opløses i salpetersyre. Uranet og plutoniet ekstraheres fra opløsningen og reforarbejdes til nyt brændsel. Praksis har dog hidtil hovedsagelig været, at materialerne lægges på lager. Den salpetersure opløsning af fissionsprodukter og en del transuraner, der bliver til rest efter ekstraktionen, er det egentlige højaktive affald. Opløsningen er hidtil blevet oplagret på underjordiske tankanlæg, men dette er ikke nogen accepteret langtidsløsning. I stedet arbejdes der med metoder til omdannelse af opløsningen til et fast, sammenhængende tungt opløseligt materiale, f.eks. ved inddampning og sammensmeltning med passende tilslagsstoffer så der dannes et glas, der kan støbes ud f.eks. i rustfri stålcyindre. Ved omdannelse til glas bindes de skadelige stoffer i affaldet, så de ikke eller kun meget langsomt spredes, hvis enheden kommer ud for uheld under transport, eller hvis den under oplagringen udsættes for påvirkning af strømmende vand.

Franskmændene er længst fremme med industriel fremstilling af højaktivt glas, idet et fabrikationsanlæg i fuld skala er ved at blive afprøvet, men også i Vest-Tyskland, England, USA og USSR arbejdes der med tekniske metoder til glasfremstillingen.

Oparbejdningskapaciteten på de eksisterende anlæg er i øjeblikket for lille til at betjene de eksisterende kraftværker, men en større udbygning kan påregnes i Europa i de kommende år. Derimod har USA indtil videre "udskudt oparbejdning på ubestemt tid".

1.6. Deponering af højaktivt affald

Det højaktive affald fra oparbejdning skal kunne slutdeponeres på sikker vis. Dokumentation for at dette kan gennemføres er i de senere år mere eller mindre blevet en politisk betingelse for at tillade videre udbygning af atomenergiproduktionen. Såfremt man ikke vil anvende oparbejdning, er det selve det brugte brændsel, der må bortskaffes og som dermed udgør det højaktive affald. Lande, der har eller ønsker at få nukleare kraftværker, må inden for deres egne grænser skaffe sig mulighed for bortskaffelse af affaldet, idet det i øjeblikket, på grund af den megen diskussion om emnet, er ret umuligt at få andre til at påtage sig denne opgave. Dette forhold kan dog naturligvis ændre sig, når man bliver mere fortrolig med problemets virkelige omfang.

Økonomisk er det muligt at investere meget i sikker oplagring af de rumfangsmæssigt små mængder højaktivt affald uden at dette påvirker energiprisen. Metoden, der efter af sandsynlighed vil blive anvendt, består i anbringelse i geologiske formationer dybt under jordoverfladen. Der lægges vægt på, at formationen skal være tør eller have meget ringe vandgennemslivning, idet transport med vand er den mest sandsynlige måde, hvorpå de skadelige stoffer i affaldet kan tænkes ført tilbage til jordoverfladen. Principielt anvendelige forekomster af stensalt, tætte krystallinske bjergarter, skiffer og ler forekommer mange steder i verden og også i Danmark. Hvorvidt en konkret forekomst virkelig er acceptabel for deponering af højaktivt affald, kræver imidlertid detaljerede geologiske undersøgelser, der endnu ikke er blevet gennemført, ligesom egentlig forsøgsdeponering ikke er blevet påbegyndt noget sted i verden. En sådan demonstrationsoplagring er dog også kun af begrænset værdi, idet en sikkerhedsvurdering altid må bygge på kendskab til mekanismer, der kan påvirke affaldet under langtidsoplagringen, mere end på en eventuel korttidserfaring med drift af et demonstrationsanlæg.

De største praktiske problemer ved udformning af et slutlager for højaktivt affald hænger sammen med varmeudvikling på grund af det radioaktive henfald i materialet. Det er ikke særlig kraftige varmekilder, der er tale om, men anbringelsen i geologiske formationer, der kun tillader langsom bortledning af varmen, bevirker alligevel at temperaturen langsomt stiger. Varmeudviklingen er derfor begrænsende for hvor tæt affaldsenhederne kan anbringes i et underjordisk

lager. I de første 300-500 år er giftigheden af affaldet meget høj, men den aftager stadig for efterhånden at synke til niveauer, der ikke adskiller sig fra mange naturligt forekommende mineraler. Det synes ikke at være nogen uløselig opgave at sikre, at affaldet bliver hvor det skal i dets første virkeligt farlige periode. Sikkerheden på meget langt sigt i tusinder eller hundredtusinder af år vil altid være vanskelig at dokumentere, men dels er der måske ikke så megen grund til bekymring, og dels vil en del faktisk kunne gøres også i denne retning.

2. REAKTORDRIFT

2.1. Rensningssystemer

De reaktortyper, det kan komme på tale at anskaffe her i landet, vil mest sandsynligt være af typen PWR eller BWR. Disse vandkølede reaktorer er afhængige af forskellige vandrensningssystemer for at opretholde den kvalitet i det cirkulerende reaktorvand, der er nødvendig for at forhindre korrosion og afsætninger på brændselselementerne. En skematisk fremstilling af systemet i en BWR er givet i fig. 2. Det normale er at anvende jonbytning eller eventuelt jonbytning kombineret med filtrering til rensning dels af en sidestrøm, der tages ud fra selve reaktortanken, og dels til rensning af hele mængden af kondenseret damp. Det sidste er blandt andet en sikring mod, at større mængder chlorid fra eventuelle utætheder i en havvandskølet kondensator skulle blive ført ind i det meget rene vand i reaktortanken. En anden funktion af vandrensningsanlæggene er at begrænse mængden af udlækkede fissionsprodukter og aktiveringsprodukter, der cirkulerer i vandsystemet, og som måske ville afsætte sig på steder, hvor de kunne give strålingsdoser til driftspersonalet.

Når jonbytternes kapacitet er opbrugt, kan de regenereres, men det er også almindelig praksis simpelt hen at udskifte dem med ny masse. I så fald bliver den brugte jonbyttermasse i sig selv til radioaktivt affald. Ved regenerering vil regenereringsvæskerne komme til at indeholde de frarensede radioaktive stoffer. Sådanne regenereringsvæsker og andre former for radioaktivt forurenede vand fra hjælpesystemer og dekontamineringsarbejder på reaktoren renses normalt ved destillation. De radioaktive stoffer opsamles herved i en indampningsrest.

Fast affald forurenet med små mængder aktivitet vil også fremkomme på en reaktor navnlig i forbindelse med vedligeholdelsesarbejde og lignende.

2.2. Behandling og oplagring af reaktoraffald

Brugte jonbytttermasser og inddampningskoncentrater bringes på fast form ved blanding med cement eller ved indtørring og blanding med smeltet asfalt eller plast, hvorefter massen udstøbes i passende beholdere. Herved opnås at affaldet omdannes til let håndterbare og tungt opløselige enheder, der er velegnede for slutdeponering. Tilsvarende kan brændbar fast affald forbrændes og asken indesluttet på lignende vis.

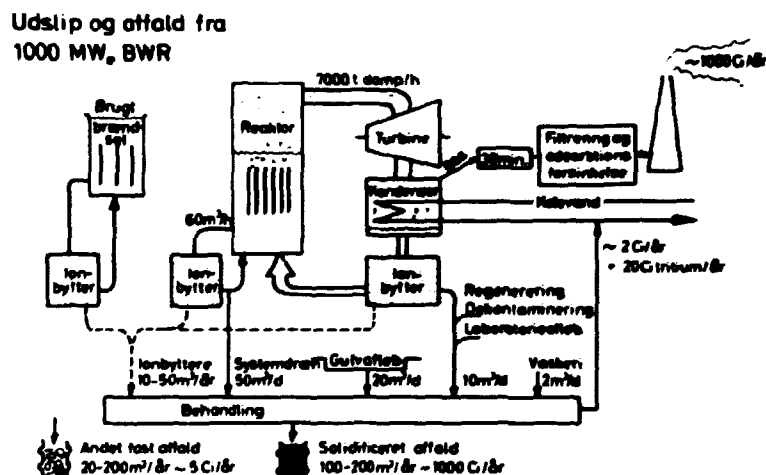
Reaktoraffaldet indeholder normalt ikke transuraner. Såfremt affaldet hidrører fra en driftsperiode, hvor der har været skader i brændselsindeslutningen, vil affaldet imidlertid indeholde langlevende fissionsprodukter. I så fald kan det være nogle hundrede år, inden affaldets giftighed er aftaget så meget, at den svarer til f.eks. giftigheden af naturligt radioaktivt stof i en tilsvarende mængde almindelig jord, der altid indeholder små mængder uran og datterprodukter heraf. Aktivitetsindholdet i reaktoraffald er over en million gange lavere end i højaktivt affald. Som følge heraf, er der ingen problemer med henfaldsvarme. Beskyttelse af driftspersonalet mod ydre stråling fra affaldsenhederne vil dog stadig være nødvendig.

Slutdeponering af reaktoraffald eller såkaldt lav- og middelaktivt affald fra reaktorer er på grund af de meget lavere aktivitetsniveauer og fravær af transuraner et sikkerhedsmæssigt meget simplere problem end deponering af højaktivt affald. Til gengæld skal problemet nødvendigvis løses inden for landets grænser. Simple nedgravning i kontrollerede områder kunne for så vidt komme på tale og anvendes mange steder i udlandet. I et tæt bebygget land som Danmark ville det dog nok være rimeligere at anvende en eller anden form for mere kontrolleret oplagring, så små udslip af aktivitet til jorden omkring lageret kan forhindres.

3. NEDLAGTE NUKLEARE ANLÆG

Når et nukleart anlæg er udtjent, det skønnes for en reaktor at være efter 30-40 års brug, skal det demonteres, og arealet hvorpå det står så vidt muligt frigøres til andre formål. Man vil dog nok altid vente til nogle årtier efter nedlukningen af en reaktor, inden man skrider til egentlig nedrivning. Herved får en mængde kortlivet aktivitet, der findes tilbage i reaktorens konstruktionsmaterialer, også efter det sidste brændsel er fjernet, tid til at falde hen. Mængderne af radioaktivt materiale fra nedrivning af en reaktor er væsentlig mindre end den mængde reaktoraffald, reaktoren har produceret i løbet af sin levetid. Lave koncentrationer af langlivede aktiveringsprodukter vil forekomme, men oplagring af affaldet skønnes ikke at give særlige vanskeligheder.

Fig. 2.



Oversigtsdiagram over de vigtigste rensningsoperationer ved en 1000 MW kogende-vandsreaktor. De på figuren givne tal for årlige udslip og affaldsmængder er omtrentlige og varierer med anlæggets konstruktion og drittsmåde.

E. RISØ'S ARBEJDE MED VINDENENGITEKNIK

Helge Petersen

1. INDLEDNING OG STATUS

Den overvejende del af arbejdet indgår i eller udføres i tilknytning til Handelsministeriets energi FOU-program, 1. og 2. fase. Følgende projekter er igang indenfor Handelsministeriets og elværkernes vindkraftprogram:

- a. Gedsermølle-måleprogram
- b. Propellrotorkonstruktion til to 600 kW demonstrations-vindmøller.
- c. vindklimatologiske undersøgelser.

Endvidere er som projekt for Handelsministeriet nyligt iværksat:

- d. Prøvestation for mindre vindmøller.

Arbejdet udføres i Reaktorteknik-, Metallurgi-, Konstruktions- og Elektronikafdelingen samt Meteorologisektionen.

a. Gedser-måleprogrammet

Gedser-måleprogrammet omfatter sammenhørende målinger af meteorologiske, strukturelle og effektmæssige data for varierende vindbelastninger på den renoverede mølle ved Gedser. Målingerne er igang og afsluttes i vinter.

b. Propellrotorerne

Propellrotorerne har vinger med 20 m radius, udført i stål og glasfibermateriale. Risø's rådgivende bistand til projektet er koncentreret om konstruktive, beregningsmæssige og material-tekniske undersøgelser vedrørende udformningen af rotorerne, samt disses fremstilling. Arbejdet med projektering og produktion af vingerne til de 2 store vindmøller for Handelsministeriets og elværkernes vindkraftprogram er så langt, at fremstilling af prøvestykker af vingebjælker er foretaget hos Vølund A/S i Viborg, og at vingeskalierne til prøvevingerne er færdige hos O.L. Boats i Ringsted. I slutningen af året vil prøvevingerne (på 6 m længde)

blive færdiggjort og laboratorieafprøvet hos BKF, ATV og ABK, DTH. Derudover forventer Risø at deltage i udførelsen af et måleprogram på de 2 nyanlæg efter lignende retningslinier som Gedsermålingerne. Feltnålinger på det første anlæg påregnes indledt i foråret 1979.

c. Vindklimatologiske undersøgelser

Udover meteorologiske målinger i forbindelse med de omtalte vindkraftanlæg påregnes gennemført Vindklimatologiske undersøgelser med sigte på udarbejdelse af vindatlas for Danmark til brug for vurdering af mulighederne for indpasning af vindkraftanlæg i den danske el-forsyning.

d. Prøvestationen for mindre vindmøller

Prøvestationen for mindre vindmøller er en ny aktivitet, som er igangsat efter aftale mellem Handelsministeriet og Risø. Der er nedsat en styregruppe med medlemmer fra ministeriet og en række institutioner, og det første møde afholdtes i maj. Det er hensigten at afprøve ca. 5 forskellige mindre vindmøller, der opstilles på Risø, syd for Landbrugsforsøgsafdelingen. Den første vindmølle er i ordre hos Boe og Chr. Riisager, en 45 kW, 3-bladet vindmølle på et 18 meter højt tårn.

2. STRUKTUREN I HANDELSMINISTERIETS OG ELVÆRKERNES VINDKRAFTPROGRAM OG RISØ'S INDSATS HERI

Vindkraftprogrammet gennemføres i et samarbejde mellem Handelsministeriet og de danske elværker. Vindkraftprogrammets samlede 2-års budget på 14.26 mill. kr. dækkes ved en bevilling fra finansudvalget (11.26 mill. kr.) samt ved tilskud fra Elsam (1.25 mill. kr.), Kraftimport (1.25 mill. kr.) og Dansk Elværksforenings Udredningsafdeling (DEFU) (0.5 mill. kr.). Herudover regnes der med et mindre bidrag fra ERDA, USA's energiforskningsstyrelse (0.9 mill. kr.).

Handelsministeriet står som ejer af og bygherre for de nye vindkraftanlæg og meteorologiske målemaster m.v. På et senere tidspunkt, efter byggeriet og efter afslutningen af den egentlige forsøgsfase, kan der dog blive tale om, at elværkerne overtager

de nye vindkraftanlæg med henblik på produktionsdrift.

Den overordnede styring af vindkraftprogrammet varetages af en styringsgruppe med medlemmer fra elværkerne, Danmarks tekniske Højskole, Miljøministeriet og Handelsministeriet. Handelsministeriet har overdraget DEFU at koordinere og administrere programmet. Ingeniører fra Elsam og Kraftimport varetager projektledelsen af de tre projekter, der omfatter:

- a) retablering af Gedser møllen med efterfølgende målinger og analyser,
- b) opførelsen af 2 større vindkraftanlæg,
- c) vindmålinger samt valg af pladser for forsøgsmøller.

Risø deltager i alle de nævnte 3 projekter såvel som i en planlagt udarbejdelse af et vindatlas.

Projekt a: målinger på Gedser-forsøgsmøllen

Gedsermøllen er den sidste og største af i alt 3 forsøgsmøller, bygget i 1950'erne af SEAS. Med en trebladet rotor med diameter 24 m og en navhøjde på 24 m kan den yde maksimalt 200 kW, og den var for sin tid en stor mølle. Den blev taget ud af drift i 1968.

Møllen er således et vellykket design, og efter 10 års stilstand sættes den nu igen i drift, foreløbig indtil maj 1979. I den periode skal der foretages ret omfattende målinger med følgende formål:

- bestemmelse af effektkurve
- bestemmelse af belastningerne på dele af konstruktionen, specielt rotorbladene
- bestemmelse af kvaliteten af den afgivne effekt.

Målingerne udføres af et konsortium bestående af Risø, Afdelingen for Bærende Konstruktioner (ABK), DTH og Skibsteknisk Laboratorium (SL). Risø's Konstruktionsafdeling leder projektet, som omfatter både laboratorie- og feltmålinger.

Feltemålingerne udføres af Risø og SL med bidrag til instrumenteringen fra ABK. Under et antal kortvarige målekampanjer foretages målinger af rotorens strukturelle response, sideløbende med målinger af akselmomenter, kabine- og rotorposition samt accelerationer og belastninger på tårntoppen. Risø står for de strukturelle målinger på rotoren, som omfatter måling af de

vigtigste snitkræfter i 4 snit i hver vippe ved hjælp af ca. 100 strain gauges, som er monteret på de to vingers hovedbjælke.

Der tages et sæt sammenhørende måleværdier 50 gange i sekundet. Herved tilstræbes det, at alle væsentlige belastningsparametre og deres tidsforløb beskrives så godt, at de bl.a. kan bruges som kontrol af beregningsmetoder.

Der er yderligere, 25 m vest for møllen, opstillet en meteorologisk målemast, hvis instrumentering tjener to forskellige formål. Det ene er at foretage klimatologiske målinger som beskrevet nedenfor, det andet er at foretage målinger simultant med de effekt- og strukturmålinger, som er beskrevet ovenfor.

Opgaven udføres i et nært samarbejde institutionerne imellem. Internt på Risø løses opgaven, som bl.a. har medført en del instrumentudvikling, af en projektgruppe med deltagelse fra Konstruktionsafdelingen, Elektronikafdelingen og Meteorologisektionen.

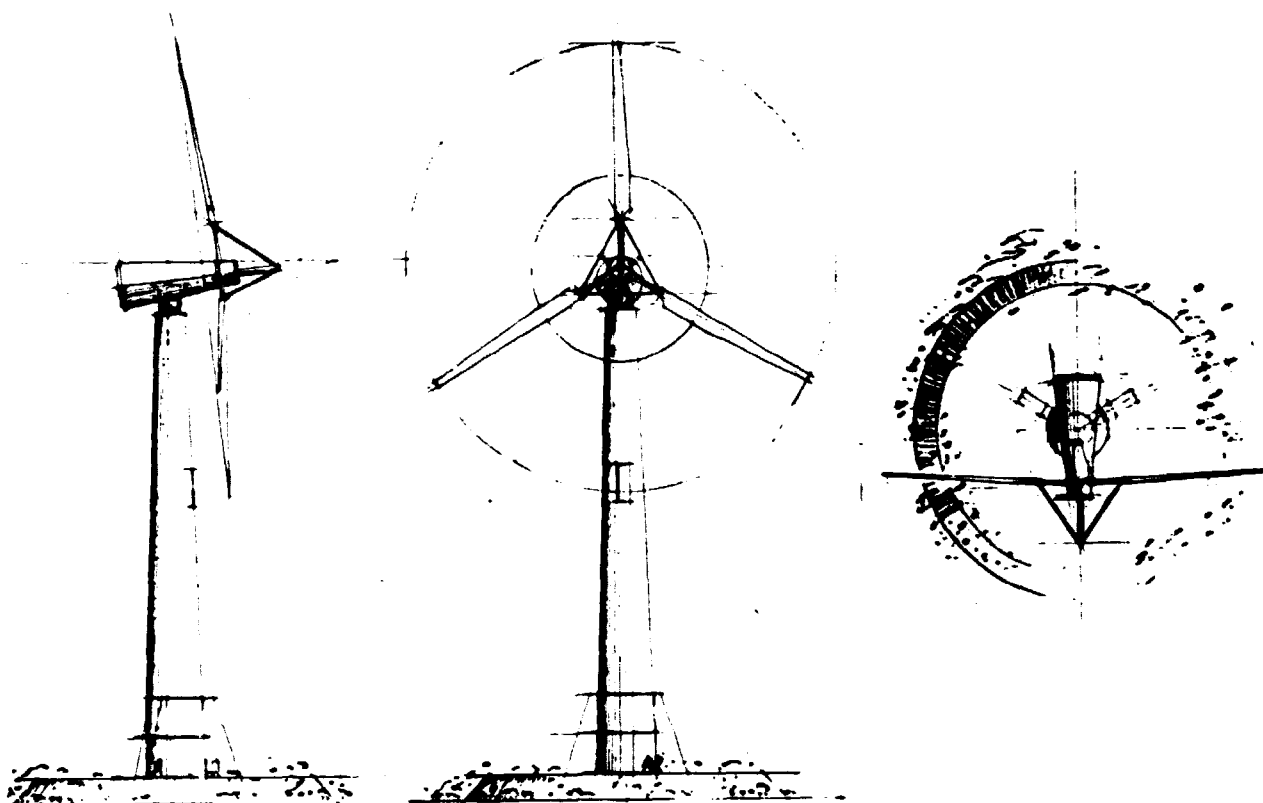
Projekt b: 2 større vindkraftanlæg

På grundlag af en undersøgelse af en lang række anlægstyper samt ret omfattende kontakter til flere vindkraftprojekter (især i USA og Sverige) er udformningen af de to større vindmøller nu fastlagt.

Anlæggene bliver af propeltypen, idet denne type principielt anses for teknisk og økonomisk at være mindst lige så god som nogen anden mølletype, og idet propelmøllen udviklingsmæssigt er flere år forud for de nærmeste "konkurrenter" (især Derrieusmøllen).

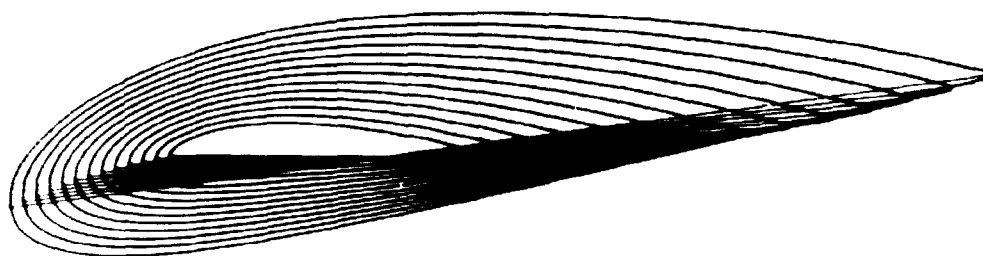
De to nye propelmøller projekteres begge med rotoren placeret på tårnets vindside, en 3-bladet rotor, diameter 40 m, vinger af glasfiber (jfr. nedenfor), et tre-trins gear med udveksling ca. 1:40, en 4-polet asynkron generator på ca. 600 kW og med betontårn ca. 45 m højt.

Navkonstruktionerne bliver forskellige (afstråbede, henholdsvis fribærende blade), ligesom bladvinkelreguleringen bliver det. For at sikre en æstetisk god udformning af anlæggene er et arkitektfirma blevet inddraget allerede på skitseprojekteringsstadiet.

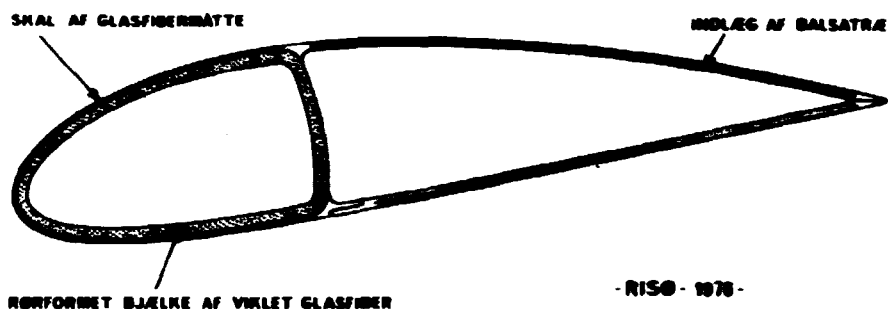


Så vidt muligt bygges vindmøllerne af dansk industri. Byggeriet vil i hovedsagen blive gennemført i 1978 og begge anlæg regnes igangsat i første halvdel af 1979. Risø medvirkede ved vurderingen af placeringen for de to møller. Prisen for de to anlæg er vurderet til ca. 14 mill. kr. eksklusiv projektering. Produktionen ved en god kystplacering er skønnet til ca. 1.5 GWh/år (1.500.000 kWh/år). Risø deltager inden for to arbejdsområder i projekteringen af de større vindmøllers rotor. I Metallurgiaafdelingen behandler man delopgaven: materialer, mens man i Konstruktionsafdelingen og Reaktorteknikafdelingen behandler delopgaven: vingestruktur.

Arbejdsområdet vingestruktur omfatter rotorgeometri, vingeres design, opbygning og beregning, fabrikationsplanlægning og kontrol. Der er et nært samarbejde med Danmarks tekniske Højskole, Afdelingen for Fluid Mekanik, som varetager rotorens aerodynamiske udformning og beregningerne af de belastninger, som vingerne skal dimensioneres for. Vingerne opbygges med en bærende hovedbjælke, som inderst er af stål, mens den yderste del vikles op af glasfiberplast. Dækskallerne er af glasfiberplast.



-AFB- 1978-



-RISØ- 1978-

I forbindelse med materialevalg til vingerne deltager Metallurgiafdelingen med fastlæggelse af arten af glasfibre, deres overfladebehandling og typen af plast, som er polyester. Mekaniske egenskaber, især elastiske konstanter, af disse glasfiberplastmaterialer fastlægges til brug ved beregning og design af vingerne.

Fremstilling af komponenter i glasfiberplast er i overvejende grad et håndværk baseret på erfaring; men specielle opgaver, f.eks. samling af stål og glasfiberplast og vikleteknik for glasfiberplast, kræver indledende undersøgelser. Vikleteknikken er en automatisk metode til fremstilling af rørformede emner og giver, på længere sigt, mulighed for en billig produktion.

Kontrol med vingerne vil være nødvendig ved bygning af vingen og under driften af møllerne; kontrolopgaverne omfatter vingerens dimensioner, materialestruktur og mekaniske egenskaber, herunder prøvebelastninger af vingerne.

Projekt c: Vindmålinger samt valg af pladser for forsøgsmålinger

Som et led i de forestående undersøgelser af muligheden for anvendelse af vindkraft i Danmark vil der blive foretaget for-

skellige former for meteorologiske målinger. En del af indsatsen på denne front vil bestå i at opstille målemaster på udvalgte lokaliteter og benytte disse målemaster til kontinuerlig indsamling af data for vindhastighed, vindretning, temperatur og tryk hvert 10. minut, automatisk registreret på en minibåndoptager. Disse klimatologiske målinger, der for en stor dels vedkommende udføres af Meteorologisektionen, vil give mulighed for at vurdere, hvor stor en specifik energimængde der er til rådighed på den pågældende lokalitet, og hvor stort et energiudbytte en given vindmølle ville give ved de herskende vindforhold. Der er planer om baseret på disse samt eventuelt supplerende målinger at udarbejde et vindatlas gældende for hele Danmark.

3. PRØVESTATIONEN FOR MINDRE VINDMØLLER

Med baggrund i Handelsministeriets meddelelse "Program for udbygning af dansk energiforskning og -udvikling, 2. fase" skal der etableres en prøvestation for mindre vindmøller på Risø.

Prøvestationen skal opbygges på markerne mellem Landbrugsforsøgsafdelingen og Dyskærgård. Prøvestationens virksomhed er begrænset til en periode på 3 år, og bevillingen hertil er i alt 5 millioner kroner.

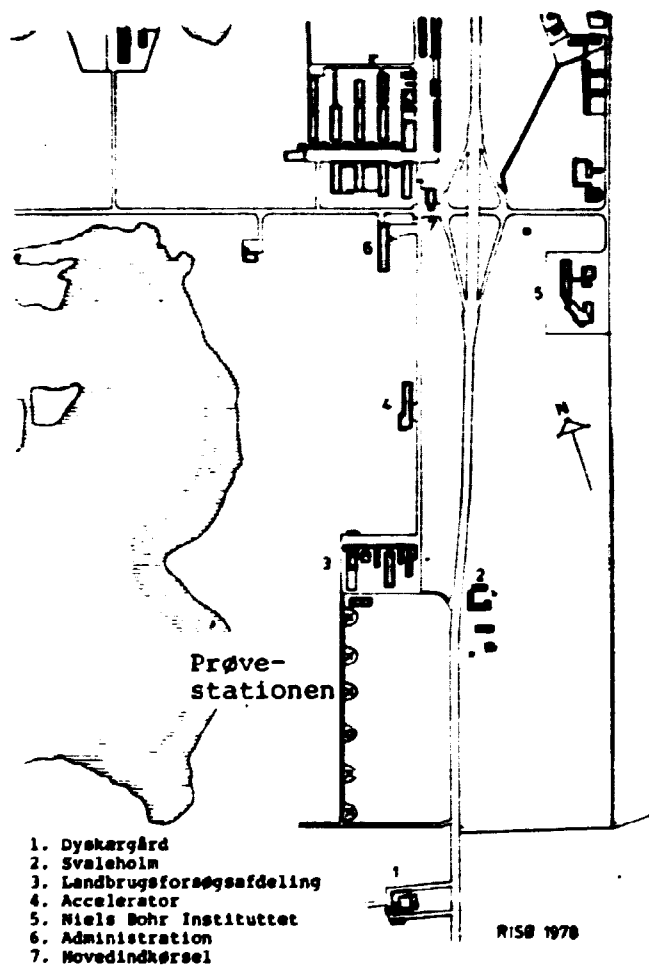
I det følgende gengives stort set den projektbeskrivelse, som er udgivet af Handelsministeriet, og hvoraf det fremgår, at det i en ATV-rapport er anført, at vindkraften under hensyntagen til reguleringsmulighederne i det eksisterende elsystem højst vil kunne indgå med et bidrag på ca. 10% af den samlede el-produktion. Denne produktion kan leveres enten af store møller alene eller af en kombination af store og små vindmøller.

Selv om en del af energiproduktionen fra de små møller konstant vil kunne afsættes i de tilsluttede bygninger, vil en større udbygning med små vindmøller i betydelig grad påvirke det potentielle marked for større vindkraftanlæg, forudsat at vindmøllerne er af den type, der producerer elektricitet og er tilsluttet nettet.

Da udenlandske undersøgelser tyder på, at kWh-prisen reduceres væsentligt, når vindkraftanlæggenes dimensioner øges, må

omfanget af den mest hensigtsmæssige udbygning med små vindmøller undersøges nærmere. Antages 1-2% af el-forbruget dækket med små vindmøller, skal der bygges 10-30.000 møller.

Da der ikke er sammenfald mellem det øjeblikkelige energi-behov og vindens øjeblikkelige energiindhold, kan kun en del (typisk 50%) af den vindproducerede el udnyttes i den tilsluttede bygning. Overproduktionen må leveres til det offentlige el-net. De i dag gældende priser for mindre vindkraftanlæg tyder på, at fremstillingsprisen må reduceres for at gøre anlæggene rentable.



Det er hensigten gennem etablering af en prøvestation for mindre vindmøller og et hertil knyttet udviklingsarbejde i et tæt samarbejde med producenter at belyse og fremme de teknologiske og økonomiske muligheder for anvendelse af disse anlæg inden for relevante områder.

Der etableres en prøvestation med plads til afprøvning af et antal mindre vindmøller. I første omgang regnes med 5 anlæg. Afprøvningen af møllerne skal tjene til belysning af problemerne om vindmøllers effektafgivelse, driftssikkerhed og vedligeholdelse samt vedrørende design, konstruktion, udførelse, produktionsmodning m.v. Afprøvningen finder sted i et snævert samarbejde med producenten.

For hurtigt at opnå erfaring med hensyn til målebehov indkøbes ved projektets start 1 eller 2 dansk producerede møller. Herudover vil prøvestationen under hensyntagen til stationens kapacitet uden vederlag gennemmåle og udarbejde forslag til forbedringer af mindre møller, som stilles til rådighed af fabrikanter.

På prøvestationen kan endvidere ske udvikling af nye konstruktioner. Dette gøres ved på grundlag af indledende studier af status for mindre vindmøller her og i udlandet og en behovsanalyse i relation til særlige danske forhold at gennemføre en konkurrence, hvor der indhentes skitseforslag til anlæg og afgive bestilling på et eksemplar af de mest lovende forslag. De bestilte anlæg opstilles på prøvestationen, gennemmåles og analyseres med henblik på eventuelle forbedringer.

I et feltmåleprogram afprøves i brugermiljø de anlæg, der tidligere er afprøvet på prøvestationen. Hvis kapaciteten tillader det, vil andre anlæg på anmodning fra fabrikanter også kunne inddrages i feltmålingerne. Feltmålingerne gennemføres dels med permanent måleudstyr af begrænset omfang (vindhastighed, produceret energi m.v.), dels med en mobil målestation, som måler mekaniske påvirkninger m.v. på konstruktionen.

Der dannes en konsulentgruppe bestående af prøvestationens personale suppleret med et antal yderligere sagkyndige med henblik på rådgivning til møllebyggere, og der etableres et nært samarbejde med de organisationer, der arbejder med vindkraftproblematikken som f.eks. O.V.E., organisationen for vedvarende energi.

Etableringsudgifterne samt udgifterne i de første tre år af prøvestationens drift dækkes af staten. Der regnes med vederlagsfri afprøvning i denne periode af mindre møller, der stilles til rådighed af fabrikanter, ligesom der regnes med en vis økonomisk støtte til feltmålingerne, så disse kan tilbydes til en pris under

de reelle omkostninger. Skal prøvestationen videreføres efter den treårige forsøgsdrift, forventes dette at ske på grundlag af afprøvnings- og konsulentgebyrer fra rekvirenter.

Prøvestationen etableres og administreres af forsøgsanlæg Risø og skal i det daglige arbejde fungere under Reaktorteknikafdelingen. Projektleder er forfatteren af nærværende artikel. En styregruppe er ved at blive dannet, og prøvestationens virksomhed skulle meget snart kunne indledes.

F. SOLENERGI TIL BOLIGOPVARMNING

Knud Ladekarl Thomsen

1. INTRODUKTION

Af Danmarks samlede energiforbrug går lidt mindre end halvdelen til bygnings- og brugsvandsopvarmning. Dette opvarmningsbehov kan teoretisk set dækkes med solindfaldet på et areal af samme størrelsesorden som den samlede tagflade af vore huse. Problemerne i forbindelse med lagring af varmen fra sommer til vinter bevirker dog, at de fleste solvarmeanlæg i praksis er mindre anlæg til dækning af en del af årsforbruget, idet resten af behovet dækkes med supplerende energi fra andre kilder. Foredraget vil hovedsageligt omhandle sådanne mindre anlæg, idet der dog også berøres metoder til sæsonlagring af varme. Inden behandlingen af solvarmesystemer gives der en kort oversigt over solindfaldet i Danmark samt en omtale af plane solfangeres egenskaber. I denne forbindelse omtales en speciel solfangertype, som er under udvikling på Risø.

2. SOLINDFALDETS VARIATION

Uden for jordens atmosfære varierer solstrålingens intensitet mellem ca. 1400 W/m^2 om vinteren og 1310 W/m^2 om sommeren (hvor afstanden til solen er størst). På grund af spredning og absorption i atmosfæren er det dog kun en del af strålingen, der når jordoverfladen. På de klareste sommerdage kan globalstrålingen, der er summen af den direkte og den diffuse (spredte) stråling målt på en vandret flade, nå op på ca. 900 W/m^2 midt på dagen. I dette tilfælde udgør den direkte stråling ca. 70% af globalstrålingen. På overskyede dage er der kun diffus stråling.

Referenceåret [2] indeholder repræsentative timeverdier gennem et helt år for globalstrålingen, den direkte stråling og den diffuse stråling. Ønsker man at beregne bestrålingen på en hældende flade, må man kende solstrålingens indfaldsvinkler for denne flade og for en vandret flade. Den direkte stråling om-

regnes i cosinusforholdet. Ved beregningen af den diffuse stråling tages der hensyn til, at den hældende flade kun "ser" en del af himmelhvalvet, og det antages, at jordoverfladens refleksionskoefficient er 0.2. Resultatet af sådanne beregninger, integreret månedsvist, er vist i fig. 1. På samme figur er ind-

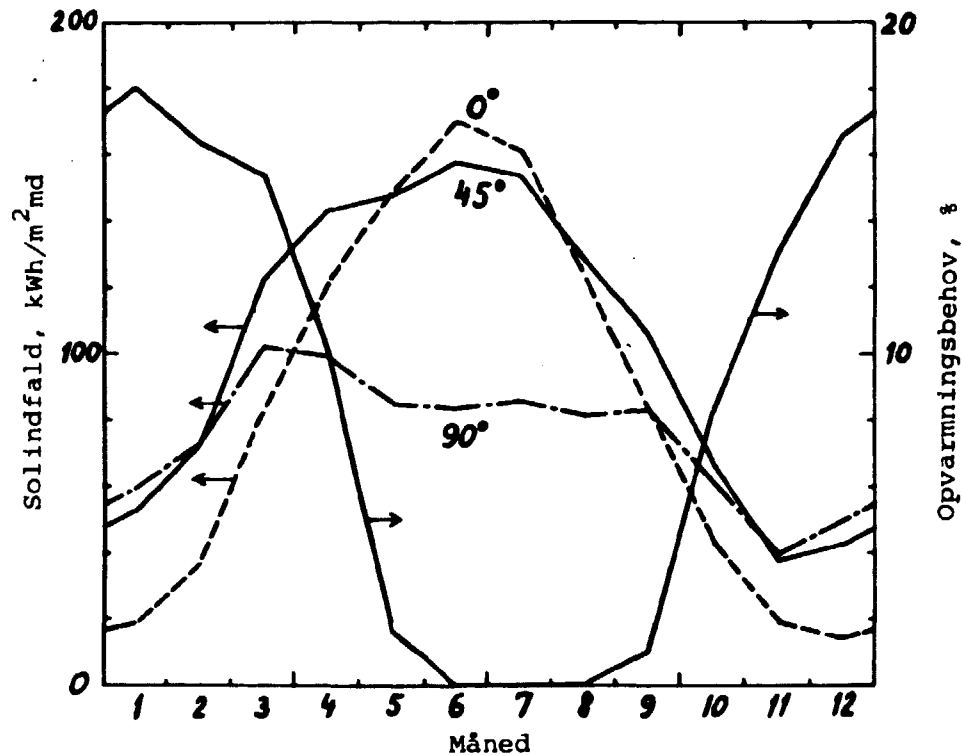


Fig. 1. Årlig variation af solindfaldet på sydvendte flader med hældningerne 0°, 45° og 90° i forhold til vandret. Til sammenligning, fordelingen af varmebehovet (excl. brugsvand) for et hus.

tegnet det relative opvarmningsbehov for et hus (excl. varmtvandsforbrug). Man bemærker, at solindfaldet om vinteren er større for en hældende end for en vandret flade. Det integrerede solindfald svarende til hældningerne 0°, 45° og 90° bliver 1025 kWh/m²·år, 1230 kWh/m²·år og 900 kWh/m²·år. Heraf udgør den diffuse stråling henholdsvis 47%, 35% og 33%.

Som påpeget i [3] ligger referenceårets solstrålingsdata for vintermånedernes vedkommende et stykke over middelværdien taget over en længere årrække. Derfor må man forvente lidt for optimistiske resultater på grundlag af disse data. I øvrigt er

der betydelig statistisk spredning for de enkelte månedsværdier. Spredningens størrelse afhænger kraftigt af hældningsvinkel og måned. For året som helhed er spredningen naturligvis mindre. For årene 1959-1969 er spredningen beregnet for hældningerne 0° , 45° og 90° . Som resultat fås spredningerne 2,4%, 3,5% og 4,4% beregnet af årsværdierne af solindfaldet. Da solindfaldets størrelse må formodes at være normalt fordelt, vil man altså få mindre end disse procentiske afvigelser fra middelsolindfaldet i 68% af årene og mindre end det dobbelte i 97% af årene. Udbyttet fra solvarmeanlæg vil formentlig svinge noget mindre, idet et lavere udbytte giver lavere lagertemperatur, hvorved solfangernes effektivitet stiger.

3. PLANE SOLFANGERE

Plane solfangere, der er de mest almindelige, kan f.eks. se ud som vist på fig. 2. De består typisk af en sortmalet absorber-

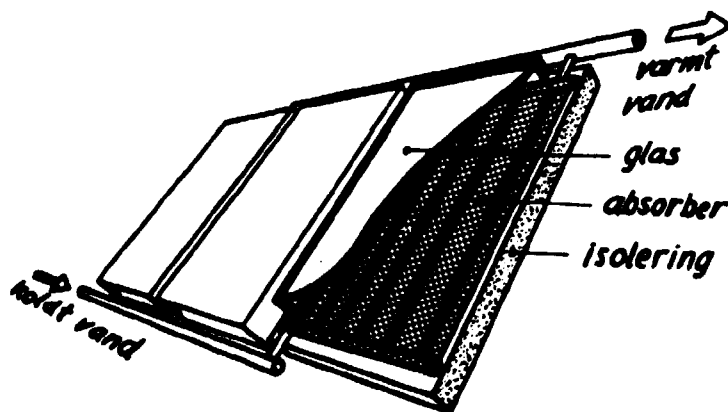


Fig. 2. Plane solfangere

berplade med væskefyldte kanaler anbragt i en isoleret kasse, der er overdækket med ét eller to lag glas.

Absorberen kan bestå af en metalplade, hvis kanaler udgøres af rør, der er fastgjort ved svejsning eller lodning. Af hensyn til varmeoverføringen til det varmbærende medium i kanalerne er det vigtigt, at der er god metallisk kontakt mellem rør og plade. En god varmeovergang fås ved at fremstille absorberen som to sammenføjede metalplader med kanalerne integreret i plademellemrum-

met (jvf. køleskabselementer). For at opnå en god dynamik skal metal og væske tilsammen have så lille varmekapacitet som muligt.

Absorberens overflade skal absorbere mest muligt af solstrålingen (kortbølget stråling). Almindelig sort maling opfylder dette krav, men samtidigt giver udstrålingen i det termiske område (langbølget stråling) anledning til tab. Disse tab kan reduceres ved i stedet at anvende selektive belægninger (f.eks. elektrolytisk påført sort nikkel eller sort krom) som stadig har høj absorptionskoefficient over for solstråling ($\alpha \sim 0.9$), men lav emissionsevne i det termiske område ($\epsilon \sim 0.1$).

Solfangerens glas skal ud over at give beskyttelse mod vejrliget transmittere sollyset og isolere absorberen mod tab ved udstråling og konvektion. I modsætning til en del plastmaterialer er glas uigennemsigtigt i det termiske område, hvilket er vigtigt, da størsteparten af tabene for ikke-selektive solfangere sker ved stråling.

På samme måde som for vinduer kan tabene ved stråling og konvektion karakteriseres med en tabskoefficient U_L . Ved en absorberpladetemperatur på 80° er U_L ca. $7,5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ og $4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ for henholdsvis ét og to lag glas. Disse værdier gælder, hvis absorberen har almindelig sort maling. For selektive belægninger med $\epsilon = 0.1$ bliver de tilsvarende tal ca. $3,7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ og $2,4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Det skal bemærkes, at ovenstående værdier svarer til en omgivelsetemperatur på 10°C og vindhastigheden 5 m/s .

Det bedste varmebærende medium set fra et termodynamisk synspunkt er vand. Ved valg af medium må der dog tages hensyn til en lang række praktiske problemer, såsom korrosionsforhold, frostsikring, kogning, m.m. Ved udformning af kanalerne og forbindelserne til solfangerne er der i øvrigt en række problemer vedrørende udluftning i forbindelse med fyldning af systemet samt indregulering til så jævn strømningsfordeling mellem alle kanaler som muligt. Mange af de omtalte problemer elimineres, hvis man anvender solfangere med luft som det varmebærende medium. Denne specielle teknik skal dog ikke nærmere behandles her.

4. SOLFANGERKARAKTERISTIKKER

Karakteristikkerne for en række forskellige plane solfangere er vist på fig. 3. Karakteristikkerne er angivet ved ligningen

$$\eta = F' \left((\tau\alpha)_e - U_L \frac{T_{fm} - T_a}{I} \right)$$

hvor nyttevirkningen η (også kaldet effektiviteten) er givet ved

$$\eta = \frac{q_u}{I}$$

q_u : Udnyttet effekt (W/m^2)

I : Solindfaldet pr. solfangerarealenhed (W/m^2)

F' : Pladeeffektivitetsfaktoren (normalt tæt ved 1)

$(\tau\alpha)_e$: Det effektive transmissions-absorptionsprodukt
(τ for glasoverdækningen, α for absorberen)

U_L : Varmetabskoefficienten ($W/m^2 K$)

T_{fm} : Middeltemperatur (K)

T_a : Omgivelsestemperatur (K)

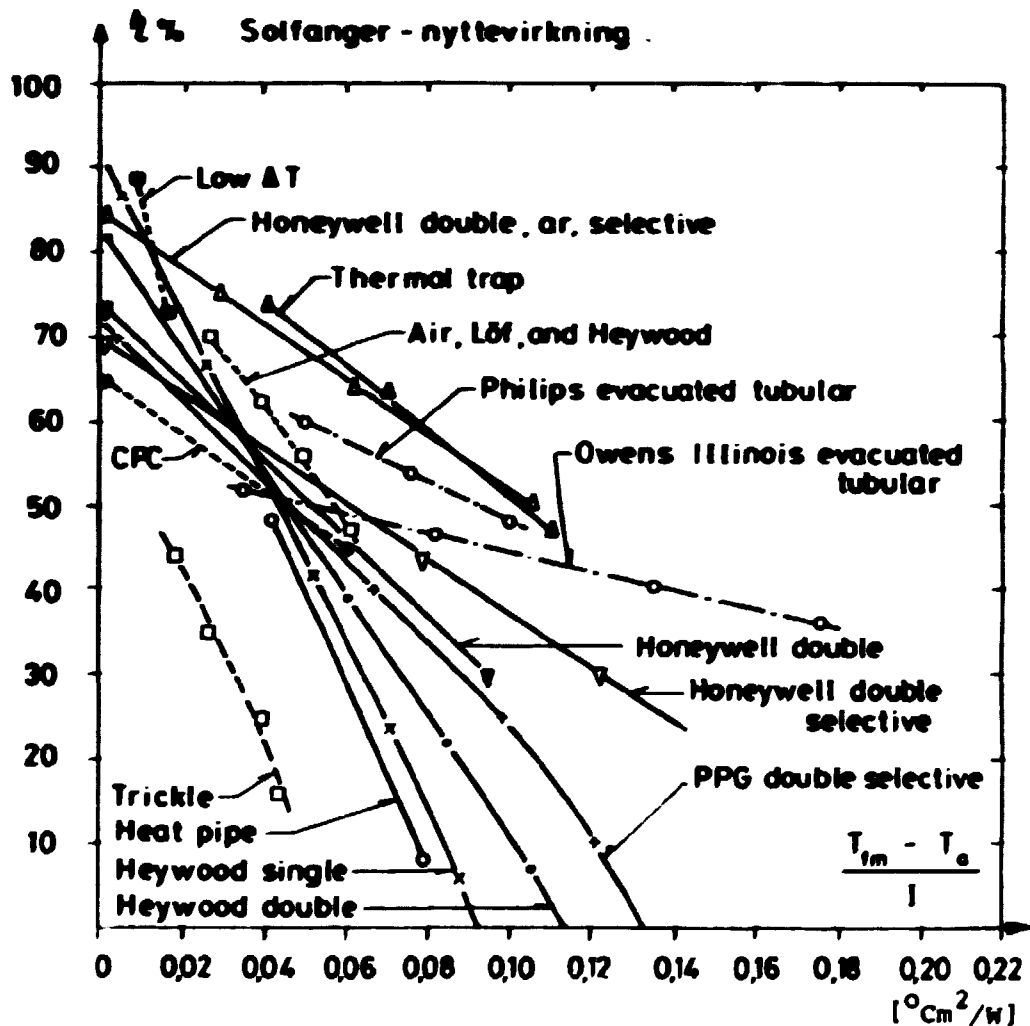


Fig. 3. Solfangerkarakteristikker. Efter [1].

Det ses, at ved lave væsketemperaturer er effektiviteten bedst for den simple solfanger med et enkelt lag glas. Det skyldes, at den har størst $(\tau\alpha)_e$. Varmetabene gør sig først gældende ved de lidt højere temperaturer, og her er de mere avancerede typer bedst. De højeste temperaturer, der kan opnås med en almindelig sort absorber er ca. 130°C med ét lag glas og ca. 165°C med to lag. Det er dog ikke alle solfangere, der opnår disse temperaturer i praksis.

5. FORSØG MED "RISLESOLFANGER" MED OLIE

Under alle de andre kurver på fig. 3 ligger en "outsider" trickle-collectoren, eller rislesolfangeren, som den er blevet betegnet på dansk. Dens princip fremgår af fig. 4, dog med den

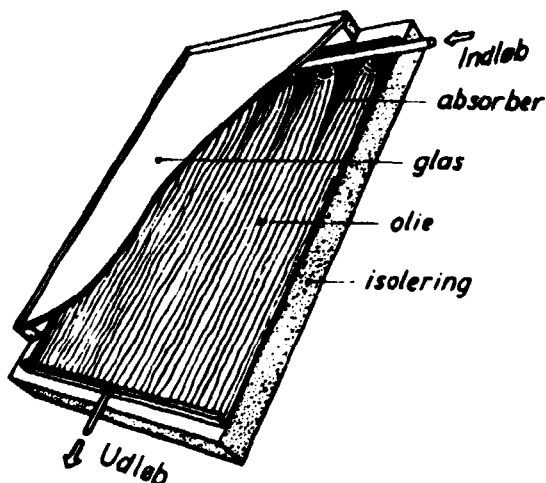


Fig. 4. Rislesolfanger med olie.

væsentlige forskel, at kurven på fig. 3 er baseret på vand som varmetransportmedium. Vandet fordeles foroven på absorberpladen ved hjælp af en række huller på undersiden af fordelerrøret, rinder ned over absorberpladen og opsamles til sidst forneden i en rende, hvorfra det strømmer videre i det kredsløb, solfangeren indgår i.

Grunden til denne solfangers dårlige effektivitet er, at vandet fordamper fra absorberpladen og kondenserer på glasset, hvorved varmetabet til omgivelserne får et ekstra bidrag. Vi har

derfor fået den nærliggende idé at erstatte vandet med olie eller en anden tungt fordampelig væske, hvorved fordampningstabene bliver ubetydelige.

For at undersøge, om oliens tilstedeværelse ville påvirke strålingsforholdene, lod vi fremstille to ens solfangere. Den ene indgår i et lille kredsløb med en pumpe og en varmevekslerspiral neddykket i en spand vand, hvorfra olien føres retur til solfangerens indløb. Den anden solfanger blev benyttet med tør absorberplade som en reference. De foreløbige undersøgelser tyder på, at solfangeren er lige så effektiv som en traditionel solfanger med olien løbende i lukkede kanaler. Da varmetabet sker fra olieoverfladen, hvor temperaturen er lavere end på absorberpladen, skulle effektiviteten faktisk blive lidt bedre end for en traditionel solfanger.

Den valgte olie er med tiden oxyderet kraftigt, hvorved et brunligt lag har udfældet sig på absorberpladen. Tilsyneladende fungerer solfangeren udmærket på trods heraf. Der er dog indledt forsøg med luftgennembobling af forskellige potentielle væsker ved 100°C for at undersøge disses iltningss stabilitet. Hvis det lykkes at finde en tilstrækkelig stabil væske, synes der at være mulighed for at fremstille billige solfangere uden frost- og kogningsproblemer. Ved at gøre hver solfanger så lang, at den strækker sig fra tagryg til tagskæg vil man desuden kunne opnå en forenkling af rørtilslutningerne.

6. ET SOLVARMEANLÆG

Solvarme kan anvendes til brugsvandsopvarmning alene eller til kombineret brugsvands- og rumopvarmning. Fig. 5 viser et principdiagram af et kombineret anlæg. Tænker man sig de stiplede og de punkterede forbindelser fjernet, bliver solvarmedelen et rent brugsvandsanlæg.

Der benyttes her en oliefyret kedel til suppleringsvarme. I sommertiden, hvor oliefyrets effektivitet er lav, kan man for det meste undvære fyret. Perioder med lav effektivitet undgås dog ikke. De vil blot forekomme på andre tider af året.

Anlægget ses at være opbygget efter den gyldne regel for solvarmeanlæg: Solfangeren skal arbejde med så lav en væsketemperatur som muligt, da man herved opnår den største nyttevirkning (jvf.

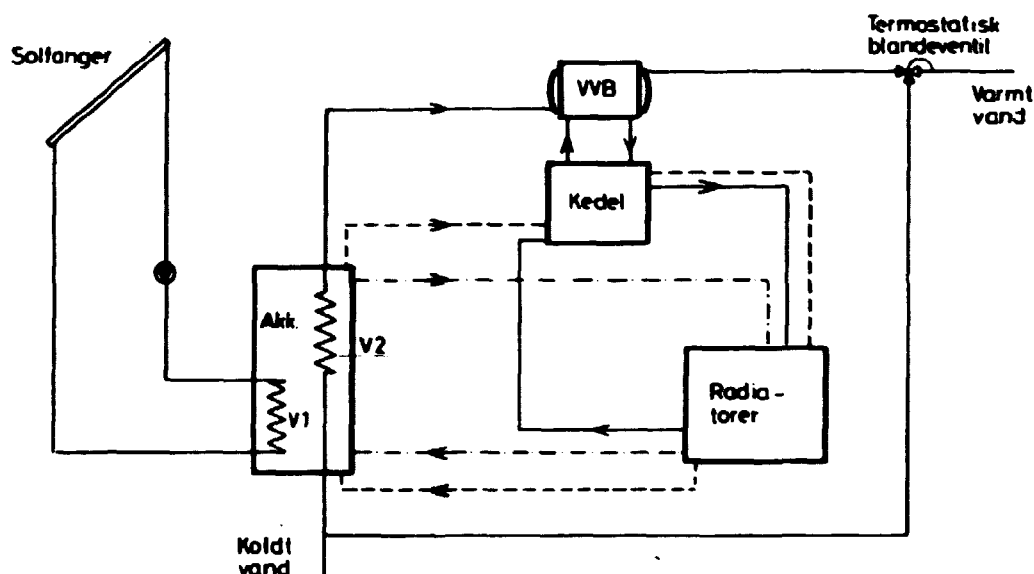


Fig. 5. Principdiagram for solvarmeanlæg.

fig. 3). Dette skal forstås således, at suppleringsvarmen fra kedelen først tilføres efter at akkumuleringsstankens vand har afgivet så megen varme til forbrugsvand hhv. radiatorvand, som det er praktisk muligt. Solfangeren afgiver altså sin varme på det koldeste sted i forbrugskredsen og opnår derved selv den lavest mulige temperatur. Dog er varmevekslerne i modstrid med ovennævnte regel, idet temperaturdifferensen mellem solfangeren og forbrugsstedet forhøjes for hver varmeveksler, varmen må passere. De to varmevekslere begrundes bl.a. med at solfangeren som oftest frostsikres med en væske, der er for dyr at anvende som lagermedium og derfor må holdes i et særskilt kredsløb, samt at brugsvandet skal holdes adskilt fra lagermediet. Varmevekslerne giver desuden trykadskillelse.

Varmeakkumulatoren (lageret) består af vand i en isoleret tank. Solfangerkredsløbets pumpe startes, når temperaturdifferensen mellem solfangerens udløb og lagertankens bund er positiv, og stoppes, når den er negativ. Vandet i lageret forudsættes i det følgende at være fuldt opblandet, så der ikke opstår temperaturlagdeling (stratificering). Det skal dog nævnes, at der er mulighed for at forøge udbyttet ved stratificeret drift, men samtidigt får man udgifter til mere avanceret styring.

Brugsvandsvarmeveksleren V2 gennemstrømmes af koldt vand hver gang, der tappes fra en varmtvandshane. Vandet opvarmes herved til en temperatur, der er bestemt af akkumulatortankens temperatur og varmevekslerens effektivitet. Fra V2 strømmes vandet over i varmtvandsbeholderen (VVB), hvor det, om nødvendigt, opvarmes yderligere med kedelvand, der cirkuleres gennem kappen. Hvis vandet i VVB er varmere end man ønsker, blandes det med koldt vand, i dette eksempel ved hjælp af en termostatisk blandeventil.

Radiator kredsløbet styres af udetemperaturen og lagerets temperatur. Hvis lagertemperaturen er højere end den nødvendige fremløbstemperatur ved en given udetemperatur, går vandet uden om kedelen (stiplet). Er lagertemperaturen lavere end returtemperaturen, fås hele varmen fra kedelen (fuld streg). I det mellemliggende område passerer vandet først lageret og derefter kedelen (punktet). Det indses af det ovenstående, at solvarmen vil dække en stadig større del af forbruget, desto lavere temperatur radiatorerne er dimensionerede til.

7. ANLÆGGETS ENERGIUDBYTTE

Det beskrevne anlæg (fig. 5) er gengivet efter [1], hvor resultater af omfattende edb-beregninger er beskrevet. Nogle af disse resultater er bearbejdet og sammenstillet i diagrammet fig. 6 for at sammenligne det årlige udbytte for forskellige anlæg. De vigtigste forudsætninger er anført i figurteksten. Absorberbelægningen er almindelig sort maling. Som det fremgår af [1] ville udbyttet stige lidt, hvis solfangerens hældning blev øget til de optimale 60° - 70° . Ligeledes kan udbyttet forbedres ved at forøge radiatorernes størrelse.

Kurverne viser, hvorledes årsudbyttet for forskellige størrelser anlæg med ét eller to lag dækglas på solfangerne afhænger af, om anlæggene kun benyttes til brugsvandsopvarmning, eller om der kombineres med rumopvarmning. I sidstnævnte tilfælde vises afhængigheden af husenes isoleringsstandard. De angivne forbrug er for huse på 120 m^2 og svarer henholdsvis til et hus fra begyndelsen af 70'erne, et hus udført efter BR 77-standard og et lavenergihus.

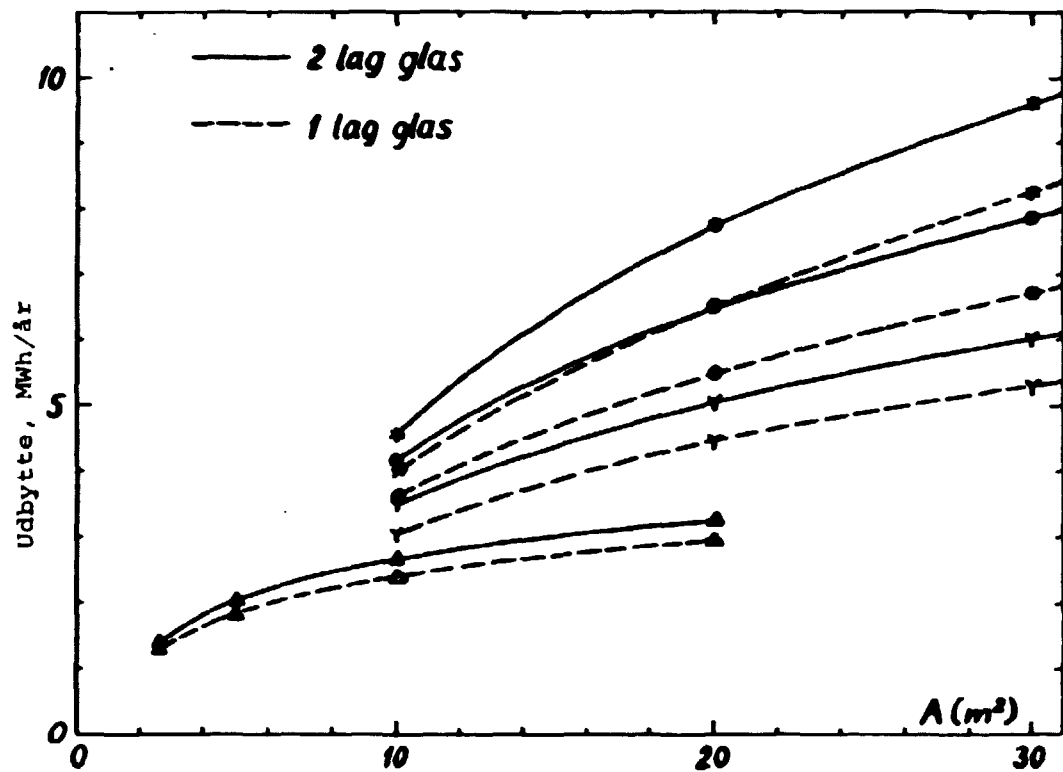


Fig. 6. Årsudbytte som funktion af solfangerareal. Solfanger sydvendt, hældning 45° . Tankvolumen/solfangerareal = 80 l/m^2 . Radiatorer dimensioneret til $60/40^\circ\text{C}$. Max. lagertemperatur 95°C . Effektivitet af V1: 51% og V2: 62%

- * Kombineret brugsvands- og rumopvarmning, 28,1 MWh/år
- Kombineret brugsvands- og rumopvarmning, 18,4 MWh/år
- Y Kombineret brugsvands- og rumopvarmning, 10,6 MWh/år
- ▲ Brugsvandsopvarmning, 4,4 MWh/år

Man ser af diagrammet,

- at man altid (måske med undtagelse af ganske små anlæg) får større udbytte ved kombineret brugsvands- og rumopvarmning end ved brugsvandsopvarmning alene,
- at et anlæg af en given størrelse udnyttes bedre jo større husets varmekonsum er. Det skal dog pointeres, at isolering i regelen betaler sig bedre end solvarmeanlæg,
- at solfangere med to lag glas giver så meget større udbytte end med ét lag, at de formentlig er økonomisk

fordelagtige. F.eks. ses det i tilfældet med det store forbrug, at et anlæg på 20 m^2 med ét lag glas giver samme udbytte som et anlæg på ca. 15 m^2 med to lag glas.

8. LAGERSTØRRELSENS BETYDNING

Beregningerne, der ligger til grund for fig. 6, går ud fra en lagerstørrelse på 80 l pr. m^2 solfanger. Det anføres (jvf. [5]), at tankstørrelser ud over 100 l pr. m^2 solfanger kun giver en meget beskeden forøgelse af den årlige dækningsgrad (udbyttet i procent af det totale forbrug).

For at belyse dette nærmere vises resultater fra forskellige kilder i diagrammet fig. 7. De fuldt optrukne kurver

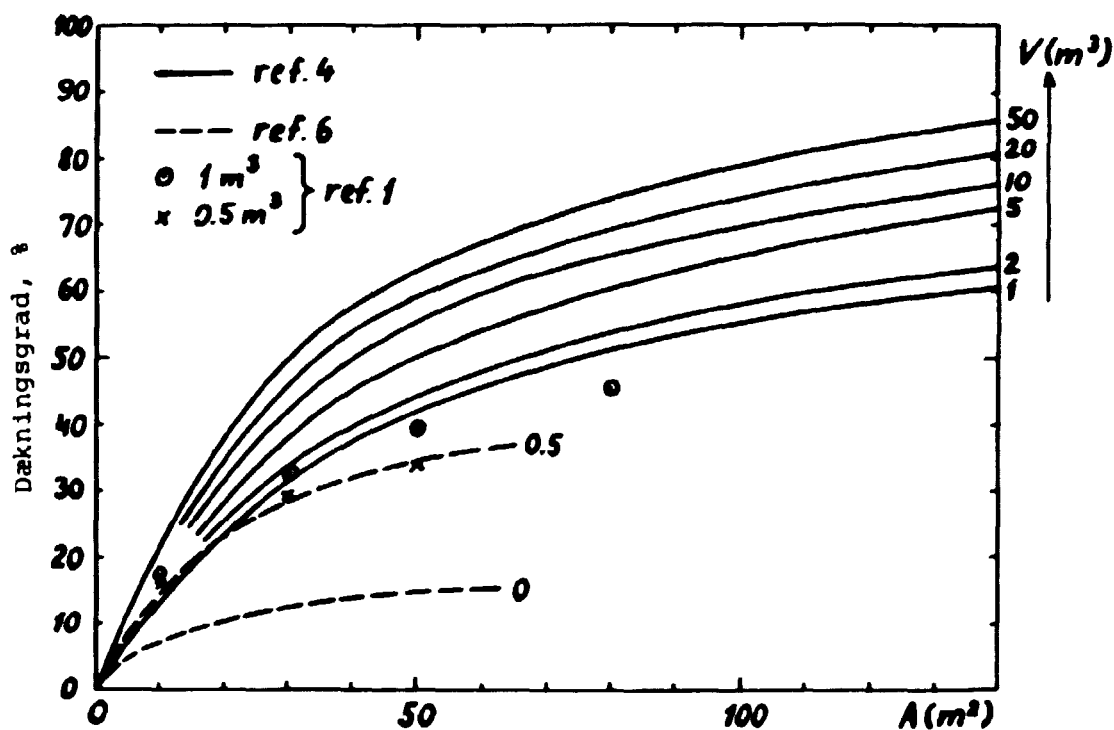


Fig. 7. Dækningsgrad som funktion af solfangerareal og tankvolumen ved et forbrug på 27 MWh/år (kombineret brugsvands- og rumopvarmning).

stammer fra en tysk undersøgelse. Solindfaldet i Tyskland og Danmark er ikke meget forskelligt, så resultaterne kan uden videre anvendes her. Man bemærker, at disse kurver stiger kraftigere med solfangerarealet end svarende til de plottede punkter, der er beregnet efter en formel i [1] med begrænset gyldighedsområde. I begge tilfælde benyttes to lag glas og ikke selektiv absorber. Afvigelserne kan formentlig forklares ved, at der kan være benyttet lidt forskellige data for solfangerne eller forskellige radiatortemperaturer.

Kurverne giver en antydning af, hvor store anlæg der behøves for at dække hele energibehovet. Det bør i denne sammenhæng bemærkes, at der for forskellige huse og et fast forhold mellem lagervolumen og solfangerareal stort set opnås samme dækningsgrad for en given størrelse af forholdet mellem solfangerarealet og husets varmebehov. Det betyder, at velisolerede huse kan få hele varmebehovet dækket med betydeligt mindre anlæg end dårligt isolerede huse. Der ligger ikke heri nogen modsætning til en af konklusionerne i forrige afsnit.

Det ses af fig. 7, at dækningsgraden stiger både for stigende lagervolumen og solfangerareal. Desuden må solfangernes effektivitet ved høje temperaturer antages at få stigende betydning, jo større en del af årsforbruget der ønskes dækket. Om en større dækningsgrad skal opnås ved at forøge lagerkapaciteten eller solfangernes areal (eller effektivitet) må blive et økonomisk spørgsmål. Muligvis vil det ved store anlæg være fordelagtigt at opdele anlægget i to eller flere grupper med hver sin solfangertype (de simpleste til forvarmning) og forskelligt temperaturniveau i lagrene.

Da lagertanke af størrelsesordenen 100 m^3 indpakket i $\frac{1}{2}$ -1 m tyk isolering er kostbare, arbejdes der på at finde billigere løsninger på sæsonlagringsproblemet. En af de muligheder, vi har undersøgt i samarbejde med firmaet Brüel, Schiøler og Jensen Aps., består i at udnytte jordens varmekapacitet i et zoneinddelt jordmagasin, der kun isoleres på jordoverfladen, og som tilføres varme gennem nedborede varmevekslingsrør. Ifølge Risø's beregninger [7] ser metoden ud til at kunne fungere med rimeligt små varmetab i områder uden grundvandsstrømning, dog bedst ved kollektiv lagring for flere huse. Metoden kræver dog videre teknisk udvikling, bl.a. for at reducere etableringsomkostningerne for et sådant lager.

Det skal til slut bemærkes, at vi på Risø arbejder med et regnemaskineprogram [8] til analyse af solvarmesystemer. Programmet, der er af amerikansk oprindelse, har fået indlagt de danske vejrdata [2]. De foreløbige beregninger har dog test-karakter og anses ikke for at være af almen interesse.

9. ØKONOMI OG KONKLUSION

En eventuel storstilet udbygning med solenergi vil, i takt med udbygningen, få stigende indflydelse på betalingsbalancen p.g.a. en forventet reduktion af brændselsimporten og en forventet stigning i importen af metaller og råstoffer til glasproduktion m.m. Herunder skal naturligvis også nævnes renterne af lån til de meget store investeringer, som ihvertfald delvist må antages at skulle foretages i udlandet eller her hjemme i konkurrence med de valutaskabende erhverv. Hvilken størrelse den nævnte indflydelse får, må vurderes i samarbejde med økonomerne. Endelig skal nævnes den positive indflydelse på beskæftigelsen.

Privatøkonomisk synes solvarmen endnu at være et usikkert investeringsobjekt, såfremt det vurderes ud fra et rent kommercielt synspunkt. Hvis det derimod antages, at solvarmeanlæggene fremstilles og installeres helt eller delvist som selvbyggerarbejde, skulle der være mulighed for at opnå økonomisk rentable anlæg.

Den mest økonomiske anlægsstørrelse afhænger bl.a. af husets forbrug, og f.eks. om huset eksisterer, eller det er nybyggeri, så det er svært at sige noget konkret. Generelt kan det siges, at anlægsudgifterne pr. m^2 solfanger falder mod en konstant værdi, medens energiudbyttet pr. m^2 solfanger falder mod 0 med stigende anlægsstørrelse. Der vil derfor ofte være et minimum på kurven over investering/årligt solenergiudbytte som funktion af anlægsstørrelsen. Man kan så beregne energiprisen ved den pågældende anlægsstørrelse og sammenligne med prisen pr. produceret energienhed fra oliefyr, elvarme, etc. Det skal dog bemærkes, at man ofte undlader at medregne udgifter til vedligeholdelse, forsikring m.m., samt at man i investeringen ofte glemmer at medregne en del af varmeanlægget, ekstra plads i fyrrum, m.m. Følgende eksempel danner ingen undtagelse.

Lad os antage, at huset med et forbrug på 18,4 MWh/år skal forsynes med et $25 m^2$ anlæg. Iflg. fig. 6 giver dette anlæg

7,2 MWh/år eller 288 kWh/m².år. Anlægget antages at koste 1.500 kr./m² solfanger og levetiden sættes til 20 år. Endvidere sættes renten til 15% p.a. og inflationen til 10% p.a. Man får da, uden at tage hensyn til skattefordelen, en pris på 0,40 kr./kWh. Regnes derimod med en skattefordel på 60% af renten, reduceres prisen til 0.17 kr./kWh, som ikke er meget forskellig fra prisen for varme produceret i oliefyr.

Det bør bemærkes, at sådanne beregninger er overordentlig følsomme over for ændringer i levetid, rente og inflation. Endvidere bør man bemærke, at det samme anlæg installeret i et dårligere isoleret hus giver lavere kWh-pris (jvf. afsnit 7). Som tidligere antydnet må der dog foretages en nøjere økonomisk analyse for at få en mere sikker bedømmelse af anlægsøkonomien. Endelig skal det heller ikke glemmes, at de praktiske erfaringer endnu er så begrænsede, at det er svært at sige, hvor godt de beregnede energiudbytter svarer til virkeligheden.

REFERENCER

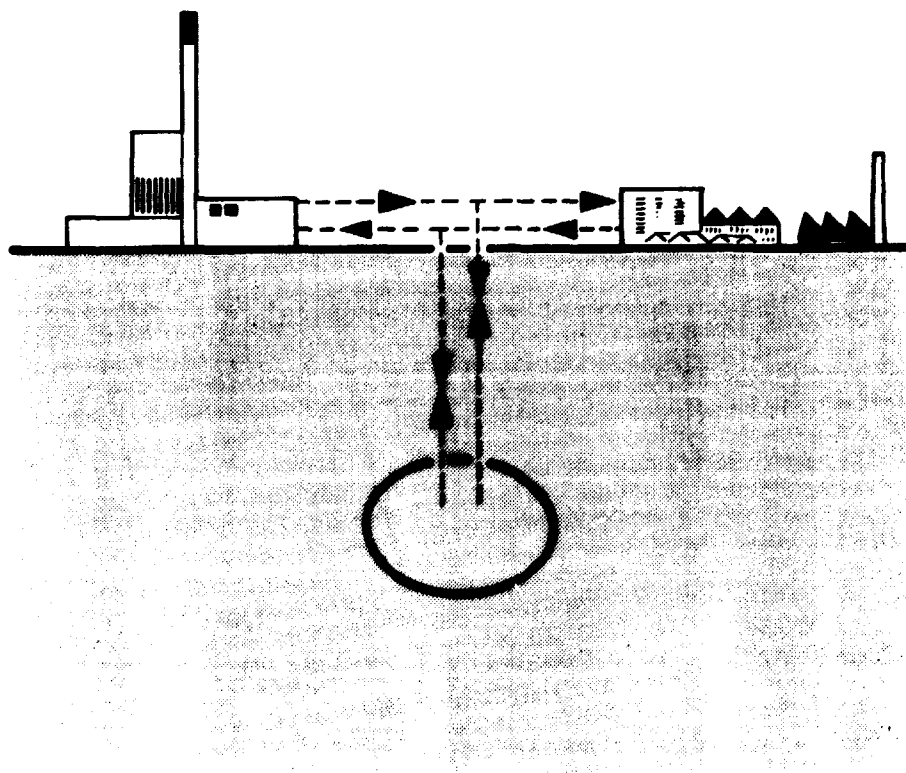
1. Solvarme, Vejledning i projektering og udførelse af anlæg, Teknologisk Institut, Varmeteknik, 1978.
2. B. Andersen, S. Eidorff, H. Lund, E. Pedersen, S. Rosenørn og O. Valbjørn: Vejrdata for VVS-tekniske beregninger. Referenceår, SBI-rapport 89, 1974.
3. F. Bason: Årlige udbyttevariationer for danske solvarmeanlæg. Varme, 42. årg., nr. 3, 1977, pp. 41-46.
4. W. Kleinkauf: Utilization of Solar Energy. ERDA-TR-144, 1976.
5. H. Lawaetz: Et solvarmesystem med varierende størrelse af akkumuleringsstank. Varme, 41. årg., nr. 3, 1976, pp. 53-57.
6. M. Altman and H. Yeh: Conservation and better Utilization of Electric Power by means of Thermal Energy Storage and Solar Heating. Final Summary Report. Pennsylvania Univ., USA, 1973. NSF-RA-N-73-005B.
7. O. Rathmann: Måske kan man snart lagre solens varme i jorden. Ingeniøren, nr. 46, 18. nov. 1977.
8. M.W. Edenburn and N.R. Grandjean: Energy System Simulation Computer Program - SOLSYS. Sandia Laboratories, New Mexico, USA, 1975. SAND 75-0048.

**Handelsministeriets program for udbygning af dansk
energiforskning og -udvikling**

Sæsonlagring af fjernvarme i undergrunden

af

J. Leth, K. Hansen



1. Baggrund for projektet

Man har i de seneste år fået øjnene op for betydningen af at udnytte verdens ressourcer og særlig energiresourcerne på en fornuftig måde. Hvis man kan finde billige og effektive metoder til lagring af overskudsenergi kan udnyttelsen af energiresourcerne forbedres samtidig med, at man reducerer investeringerne i energiomsætningsanlæggene, og forbedrer leverancesikkerheden af energi.

Der findes allerede en del metoder, såsom lagring af damp i beholdere, lagring af vand i højtliggende reservoarer og kompression af luft i beholdere eller hulrum i undergrunden, som har været eller er i brug. Mange af de metoder, som man taler om i dag har imidlertid ikke bevæget sig ud over tegnebrættet. Dette kan delvis skyldes mangel på midler, mangel på grundviden, mangel på behov fra et systemsynspunkt, eller ganske simpelt at den økonomiske situation ikke har været sådan, at man har kunnet forestille sig, at sådanne foranstaltninger kunne være rentable.

I dag er situationen imidlertid ændret. Dels fordi prisen på energi er steget, dels fordi forbrugeren gradvis har udviklet vaner som gør, at der er store forskelle mellem maksimal forbrug og middelforbrug. Det foreliggende projekt repræsenterer et forsøg på at opbygge det grundlag, som er nødvendigt for at kunne vurdere mulighederne for sæsonlagring af termisk energi i undergrunden.

Det er hensigten at føre undersøgelserne så langt frem, at lagringskonceptets praktiske gennemførlighed er demonstreret, og der er tilvejebragt grundlag for vurdering af anlægs- og driftsøkonomi for sådanne lagre i teknisk skala.

2. Beskrivelse af projektet

Projektet omfatter følgende delprojekter, som gennemføres parallelt, dog med de bindinger der ligger i, at de simple matematiske modeller skal anvendes til projektering af demonstrationsanlægget og de mere detaljerede til analyse af forsøgsresultaterne fra demonstrationsanlægget:

1. matematiske modeller

2. demonstrationsanlæg
3. geologisk kortlægning

I det følgende skal der gives en kort beskrivelse af disse 3 delprojekter.

2.1 Matematiske modeller

2.1.1 Formål

Det er delprojektets formål at udvikle beregningsmodeller til simulering af varmetransport ved hjælp af strømmende vand i porøse geologiske forekomster.

Modellerne udvikles trinvis med stigende grad af detaljering, således at i hvert fald de første modeller er til rådighed for projektering og styring af demonstrationsanlægget, mens den sidste, mere detaljerede, model anvendes til analyse af forsøgsresultater og til vurdering af fremtidige anlæg.

2.1.2 Krav til beregningsmodel

Beregningsmodellen skal være fleksibel, således at anlæg i forskellige geologiske forekomster kan gennemregnes. Modellen skal derfor kunne behandle forskellige geometriske afgrænsninger. Den skal ligeledes tage hensyn til, at vandgennemtrængeligheden og evnen til at lede varme vil variere med tid, sted og temperatur.

Disse krav kan ikke opfyldes af konventionelle hydrologiske beregningsmodeller, idet disse ikke tager hensyn til temperaturvariationer.

2.1.3 Udviklingstrin for modellerne

a. 1-dimensional (1-D) model

I denne model antages det, at strømningshastigheder og temperatur kun afhænger af afstanden fra boringen.

Modeller er allerede udarbejdet som del af et licentiatarbejde ved Laboratoriet for Energiteknik og er benyttet ved foreløbige beregninger af mindstestørrelser og af opnåelig effektivitet for et varmtvandsreservoir.

b. 2-dimensional (2-D) modeller

Disse modeller kan beskrive strømning og temperaturvariationer i enten lodret eller vandret snitplan gennem lageret. Der udarbejdes først en simplificeret model for hurtigst muligt at få et første værktøj til brug ved projektering af demonstrationsanlægget, og for at kunne vurdere den nødvendige detaljeringsgrad i den endelige 2 D-model.

c. 3-dimensional (3-D) model

Denne model, der kan beskrive strømning og temperaturvariationer i alle retninger, udarbejdes ud fra erfaringerne med 2-D modellerne. Den er den mest detaljerede model og endemålet for dette delprojekt.

2.2 Demonstrationsanlæg

2.2.1 Formål

Det er delprojektets formål at demonstrere i praksis, at fjernvarme kan lagres i undergrunden, som de indledende teoretiske beregninger har vist. Desuden skal demonstrationslageret også anvendes til verifikation af de matematiske modeller.

2.2.2 Krav til forsøgslokalitet

Til forsøgslokaliteten stilles en række krav:

- a. Egnede geologiske forekomster:
 - Passende permeabilitet, d.v.s. evne til at lade vand passere. Grus eller sand vil være egnede.
 - Porøsitet på 20-40%. Porøsiteten udtrykker, hvor tæt pakket den geologiske aflejrings er. Grus og sand vil ligeledes opfylde dette krav.

- b. Ingen vandindvinding ved lokaliteten.
- c. Varmeforsyning til rådighed.
- d. Varmeforbruger til rådighed.

2.2.3 Etablering af demonstrationsanlæg

Etableringen af demonstrationsanlægget på den udvalgte lokalitet kan efter de implicerede myndigheders godkendelse inddeles i følgende faser:

- a. Geologiske/hydrologiske undersøgelser
- b. Projektering
- c. Opbygning
- d. Forsøgskørsel
- e. Vurdering af forsøgsresultater og teoretiske beregninger

I det følgende skal de enkelte faser kort beskrives.

a. Geologiske/hydrologiske undersøgelser

a.1 Geoelektriske undersøgelser

Der udføres en geoelektrisk prospektering af det aktuelle projektområde for at få et foreløbigt indtryk af den geologiske lagfølge. Undersøgelsen vil antagelig bestå i såvel punktprofilmåling som linieprofilmåling.

a.2 Etablering af 3 boringer

For at få nøjere kendskab til lagfølgen, grundvandets potentialforhold, strømningsretninger m.v. udføres 3 boringer, der udbygges med filter i hele det vandførende lag. Boringerne skal have en dimension, så de vil kunne anvendes som pumpeboringer ved det senere pumpeforsøg.

a.3 Borhulslogging

Med henblik på at få så detaljerede informationer om de gennemborede lagserier og mulighed for en mere detaljeret korrelation af de gennemborede lag-

serier udføres γ -logging i boringen forinden denne udbygges med filter.

a.4 Pumpeforsøg (hydrauliske egenskaber)

For at få bestemt det vandførende lags hydrauliske egenskaber, skal der udføres et pumpeforsøg på een af de 3 boringer med samtidig pejling af sænkningerne i de øvrige to boringer samt eventuelt andre eksisterende boringer.

a.5 Grundvandskemi og -bakteriologi

For at vurdere udfældninger i varmeveksler og rørsystem samt i grundvandsreservoiret skal der udtages et antal vandprøver til fuldstændig kemisk analyse. Et mindre antal analyser af grundvandets bakterieindhold må udføres for at kunne konstatere eventuelle ændringer efter et lagringsforsøg.

b. Projektering

Demonstrationsanlægget er skitse-mæssigt vist i fig. 1 og 2, som det forventes at se ud med den nuværende viden. Anlægget kan opdeles i et reservoirsystem og et tilslutningssystem for fjernvarme. Reservoirsystemets 5 boringer er koblet til den ene side af et varmevekslersystem med 3 stk. 50% varmevekslere, hvis anden side er koblet til fjernvarmesystemet.

Eventuelle miljømæssige krav til et anlæg af denne type klarlægges i forbindelse med projekteringen.

Projekteringen forudsættes udført sideløbende med de geologiske/hydrologiske undersøgelser af tidsmæssige årsager.

b.1 Reservoirsystem

Ved hjælp af de eksisterende matematiske modeller og forhåndskendskab til den udpegede lokalitet, fastlægges udformningen af reservoirsystemet med boringer, rørføringer, ventiler, pumper, styring, materialer, isolering m.v..

b.2 Fjernvarmesystem

I samarbejde med det lokale varmeværk projekteres fremføringen for fjernvarmen

til den udpegede lokalitet, d.v.s. placering af rør, dimensioner, isolering føringsmåde, pumpestation m.v.. Desuden dimensioneres varmevekslere og styringen af varmetilførsel til lageret fra fjernvarmesystemet og tilbagelevering af varme fra lageret til fjernvarmesystemet.

b.3 Instrumentering til drift og forsøg

Både reservoir- og fjernvarmesystem skal kunne styres, og derfor må både vandtemperatur og vandmængde kunne måles og reguleres. Temperaturen skal måles og registreres et passende antal steder i lageret for at give tilstrækkelig information til verifikation af de matematiske modeller.

b.4 Tilpasning efter geologiske/hydrologiske undersøgelser

Ud fra undersøgelserne foretages så eventuelle tilpasninger af projektet f.eks. boringernes placering, boreddybde. Ydeligere vurderes nødvendigheden af aflastningsboringer for at standse en eventuel grundvandsstrømning gennem lageret.

Når denne tilpasning er foretaget, kendes demonstrationsanlægget i detaljer og kan derfor endeligt budgetteres.

c. Opbygning

I denne fase skal det projekterede anlæg opbygges gennem ordreafgivelse, fremstilling af komponenter, bygning af forsøgshus, etablering af boringer, føring af rør, montage af komponenter og instrumentering, afprøvning af systemer, m.v..

d. Forsøgskørsel

Forsøgskørselen forventes at strække sig over ca. 2 år for at nå ud over indklingningsfænomener.

Opvarmningen af lageret ventes at strække sig over ca. 4 mdr. forudsat at fjernvarmenettet kan bære belastningen (især ved første opvarmning).

Afleveringen af varme fra lageret til fjernvarmesystemet forventes at løbe over en tilsvarende periode.

Under forsøgskørslen registreres temperatur og flow samt eventuelle andre relevante parametre. Ligeledes følges de miljømæssige parametre løbende.

Forsøgsresultaterne bearbejdes, så de kan anvendes til vurdering af lagerkonceptet og til sammenligning med beregningsmodellerne.

e. Behandling af forsøgsresultater og teoretiske beregninger

Under forsøget skal de matematiske modeller køres med data fra forsøget for bedre løbende at kunne overvåge hændelsesforløbet.

Endelig skal forsøgsresultaterne endeligt bearbejdes og sammenlignes med de teoretiske beregninger, når forsøget er afsluttet.

2.3 Geologisk kortlægning

2.3.1 Formål

Formålet med denne kortlægning er at give en første indikation af de geologiske/hydrologiske muligheder for at placere varmelagre i nærheden af de nuværende og potentielle kraftvarmeområder i Danmark (ca. 75 områder).

2.3.2 Gennemførelse

Kortlægningen gennemføres ved at gennemgå det eksisterende borearkiv for de nuværende og potentielle kraftvarmeområder.

Fig.1. Fjernvarmelagring

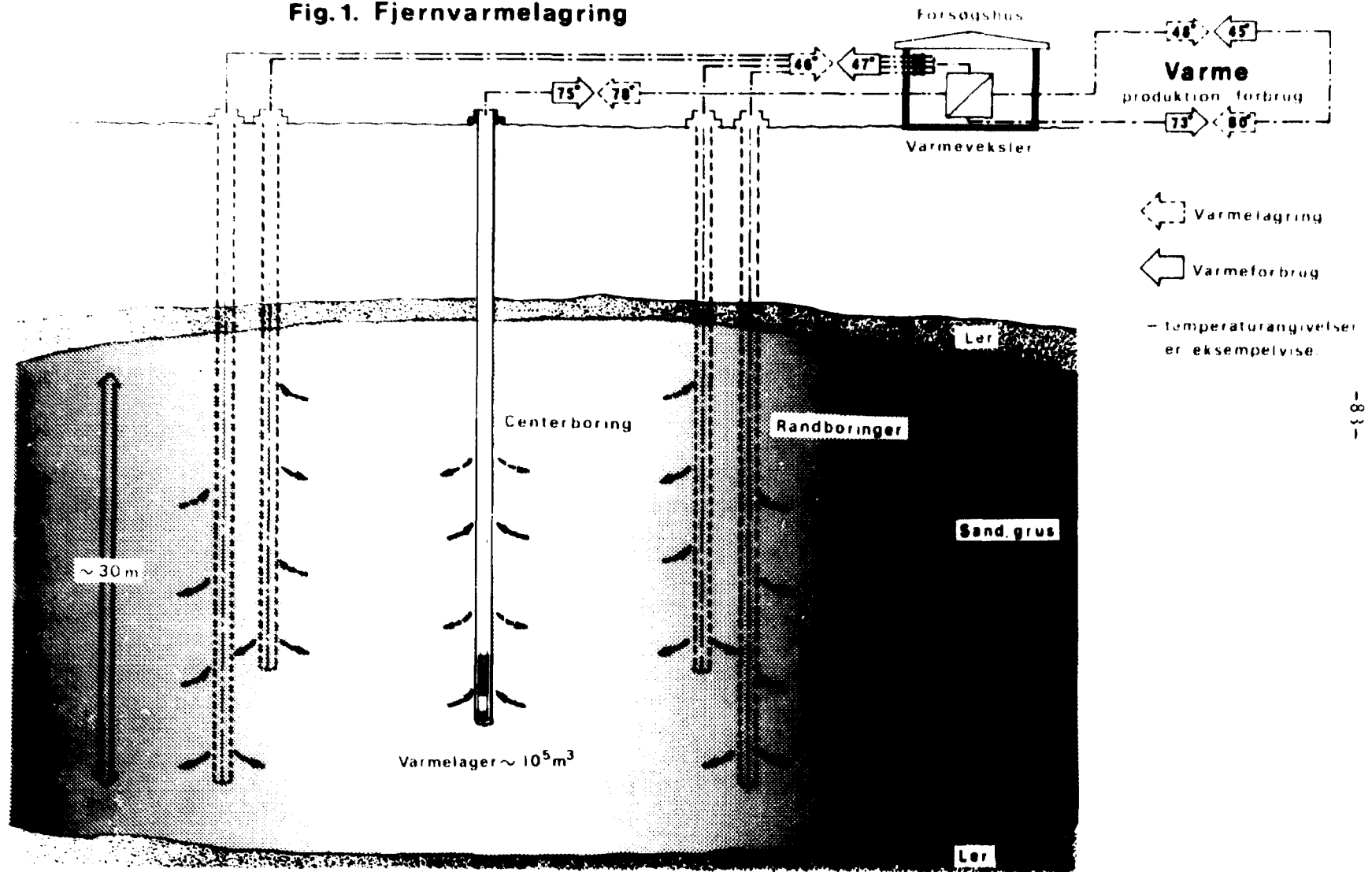
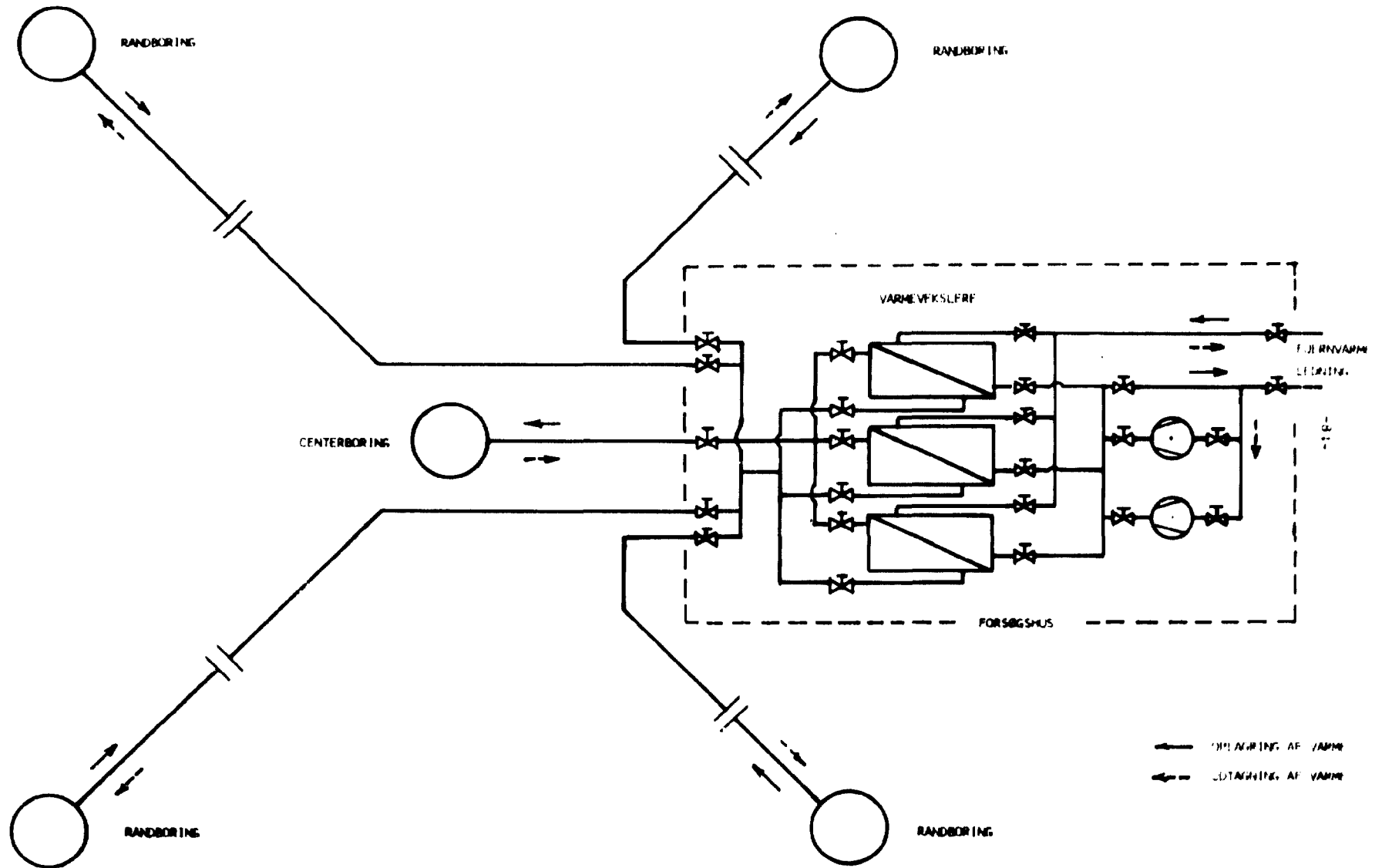


Fig. 2 Fjernvarmelagring - Flowdiagram



H. LAVTEMPERATUR OVERSKUDSVARME TIL ELPRODUKTION

af

J. Westermann

INDHOLDSFORTEGNELSE

1. Indledning
2. Rankine-proces og systembeskrivelse
3. Arbejdsmedier
4. Turbine
5. Varmvekslere
6. Mulig elproduktion
7. Anlægsudgift og besparelser
8. Driftserfaringer og aktiviteter

1. Indledning

Mange industrivirksomheder tilsidesætter stadig muligheden for en effektiv udnyttelse af overskydende procesvarme, fordi udnyttelsen ofte er forbundet med store investeringer. I en række tilfælde er det imidlertid ikke praktisk muligt at anvende varmen enten på grund af virksomhedstypen, f.eks. forbrændingsanlæg, eller fordi temperaturniveauet er for lavt.

De stigende energipriser siden energiforsyningskrisen i 1973 har skabt det økonomiske grundlag for at udnytte lavtemperatur overskudsvarme til el-produktion.

Elektriciteten kan i modsætning til varmen næsten altid anvendes af virksomheden selv uanset type eller placering.

Elproduktionen baseres på den klassiske Rankine-proces, som også er grundlaget for den almindelige vanddamp-turbine. Man benytter et lukket turbinekredsløb med et organisk arbejdsmedie, f.eks. en af de velkendte freon-typer.

Ved passende valg af arbejdsmedie kan lavtemperatur Rankine-proces systemet anvendes i temperaturområdet $50 - 450^{\circ}\text{C}$. Brugen af et organisk arbejdsmedie medfører, at overskudsvarmen kan konverteres til elektricitet med en højere virkningsgrad end den, der opnås med den ækvivalente vanddamp-proces i det anførte temperaturområde. Dette er et resultat af de organiske arbejdsmediers lave fordampningsvarme i forhold til vands, hvilket reducerer temperaturdifferencen i fordamperen og således nærmer processen reversible driftsforhold.

Stort set kan der i forhold til vanddampsystemer opnås en forbedring af virkningsgraden på 25 - 50% afhængig af overskudsvarmens temperatur. Andre forhold, som vil blive omtalt senere, af betydning for den konstruktive udformning af det organiske Rankine-proces system gør anvendelsen attraktiv.

Det skal endelig bemærkes, at de omtalte anlæg til nyttiggørelse af overskudsvarme ikke er tankeeksperimenter, men kommercielt tilgængelige anlæg, som er baseret på kendt og afprøvet teknologi.

2. Rankine-proces

Rankine-processen er basis for udnyttelsen af lavtemperatur overskudsvarme. Det er som bekendt en termodynamisk kredsproces, som konverterer varmeenergi til mekanisk energi.

Rankine-processen modtager varmeenergien fra en varmekilde - overskudsvarmen - ved en temperatur højere end omgivelsernes. En del af denne energi konverteres til mekanisk energi, medens resten bortledes ved eller nær omgivelsernes temperatur.

En underkritisk Rankine-proces for et organisk arbejdsmedie er vist i et tryk-entalpi diagram i figur 1.

I figur 2 er generelt vist et lavtemperatur Rankine-proces system til elproduktion på grundlag af overskudsvarme.

I en dampgenerator overføres overskudsvarmen (4-5-1), og der frembringes mættet eller overhededet damp. Dampen ekspanderer (1-2) igennem en turbin, og den termiske energi omdannes til mekanisk energi. Turbinen driver via et gear en elektrisk generator. Fra turbinen ledes dampen ved lavt tryk og temperatur til en kondensator, hvor den kondenseres (2-3) til væske. En pumpe hæver trykket (3-4) og pumper væsken ind i dampgeneratoren, hvorefter kredsløbet er sluttet.

Arbejdsmediets kondenseringsvarme overføres til et køleflow, som kan være luft eller køletårnsvand eventuelt havvand. Overskudsvarmen kan være varme fra ethvert kølesystem eller røggassystem.

Den ideelle virkningsgrad for den simple Rankine-proces defineres ved:

$$\eta = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{(h_1 - h_4)}$$

Anvendes en regenerator efter turbinen, så resterende overhedningsvarme i dampen anvendes til forvarmning af arbejdsmediet, inden det pumpes ind i dampgeneratoren, forøges virkningsgraden.

Det virkelige Rankine-proces system har en lavere virkningsgrad end den ideelle på grund af irreversibilitet og forskellige mekaniske tab.

I figur 3 er virkningsgraden for tilgængelige lavtemperatur Rankine-proces systemer optegnet for en kondenseringsstemperatur på 30°C tillige med Carnot-processens virkningsgrad, der er den teoretisk højeste.

3. Arbejdsmedier

Arbejdsmediets egenskaber er af væsentlig betydning ved udnyttelsen af lavtemperatur overskudsvarme.

Grundlaget er i første række de termodynamiske egenskaber og den termiske stabilitet i det betragtede temperaturområde.

Af andre vigtige faktorer må nævnes: giftighed, brandbarhed, aggressivitet og pris.

De arbejdsmedier, som anvendes og som kan anvendes er de forskellige freontyper og ammoniak. Disse medier er imidlertid begrænset til systemer med arbejdstemperaturer op til 200°C på grund af den termiske stabilitet.

Et organisk arbejdsmedie med en god kombination af de ovenfor nævnte

egenskaber er trifluoroethanol iblandet 15 mol. % vand. Dette medie er specielt egnet til Rankine-proces systemer i temperaturområdet 150°C til 450°C.

En speciel god egenskab, som er karakteristisk for de organiske arbejdsmedier, er dampliniens lodrette forløb, som medfører overhedning af dampen under turbineekspansionen, se figur 1.

4. Turbine

Egenskaberne ved de organiske arbejdsmedier bl.a. den høje molekylvægt betyder, at der kan anvendes en simpel éttrins aksial- eller radialturbine med en virkningsgrad på ca. 85%.

Turbinen er meget kompakt og har et omløbstal på ca. 11.000 o/min..

Indblæsningsdyser med variabelt areal tillader maksimal virkningsgrad i hele driftsområdet.

Turbineekspansionen foregår, som tidligere nævnt alene i det overhede område uden dannelse af fugtighed, som reducerer virkningsgraden og medfører erosion af turbineskovlene.

5. Varmevekslerer og andre komponenter

Det er tidligere nævnt og vist i figur 2, at der i systemer til udnyttelse af overskudsvarme behøves to eventuelt tre varmevekslere. Disse er dampgeneratoren og kondensatoren og måske en regenerator.

Varmevexslernes udformning er betinget af om varmetilførslen og kølingen foretages ved hjælp af et væskeflow eller et gasflow. Generelt gælder, at de designes og fremstilles med kendt teknik.

Dimensioneringen af dampgeneratoren er af stor betydning, idet systemets virkningsgrad afhænger af temperaturen. Det er vigtigt at opnå så høj en fordampertemperatur som muligt.

Ved udnyttelse af overskudsvarme vil der normalt være et bestemt temperaturfald og en maksimal temperatur til rådighed i dampgeneratoren. Disse forhold fastlægger den højeste arbejdstemperatur, som må bestemmes i hvert enkelt tilfælde. Eksempelvis vil man for en væskeformig varmekilde ved et temperaturfald på 30°C kunne opnå en maksimal arbejdstemperatur, som ligger 20-25°C under varmekildens temperatur.

Ved gasformige varmekilder vil fordampertemperaturen normalt være betydeligt lavere end varmekildens temperatur.

6. Mulig elproduktion

Hvert kølesystem eller røggassystem giver mulighed for elproduktion.

Med henblik på udnyttelsen af overskudsvarme må man kende varmekildens maksimale temperatur, flow og det tilladelige temperaturfald. Tillige må man have kendskab til den kemiske sammensætning.

Da kondenseringstemperaturen skal være så lav som mulig, må man yderligere have kendskab til køleforholdene.

I figur 4 er den elektriske effekt som funktion af den forhåndenværende overskudsvarme optegnet for forskellige maksimale arbejdstemperaturer.

Det skal her erindres, at arbejdstemperaturen afhængig af de aktuelle forhold vil være en del lavere end varmekildens temperatur.

7. Anlægsudgift og besparelser

Anlæg til udnyttelse af overskudsvarme opbygges normalt som transportable units uden særlige krav til bygninger og installationer.

Prisen for en færdig og afprøvet unit er i dag pr. installeret KW ca. Kr. 5.140,-. Hertil skal regnes tilslutningsledninger og kølesystem.

Ved elproduktion til eget forbrug på grundlag af "gratis" overskudsvarme fås en årlig besparelse pr. installeret KW på Kr. 1.680,-.

Der er her regnet med Kr. 0,20 pr. KWh og en årlig drifttid på 8400 timer.

Energibesparelsen pr. år for det samlede energisystem er pr. installeret KW ca. 19 Gcal eller ca. 2.200 kg olie.

8. Driftserfaringer og aktiviteter

Driftserfaringerne for omtalte anlægstyper i kontinuert drift beror hovedsagelig på erfaringerne fra et 3.800 KW anlæg med freon installeret hos Mitsubishi Gas Chemical i Japan. Anlægget er installeret i 1968 og har været i drift i over 70.000 timer. Rådighedsfaktoren for anlægget er over 0,98.

Foruden dette anlæg er der i de sidste 10-15 år hovedsagelig i Japan og U.S.A. opført en række mindre anlæg, som har været i drift i kortere eller længere tid. Bl.a. er der opført mindre anlæg til udnyttelse af solenergi.

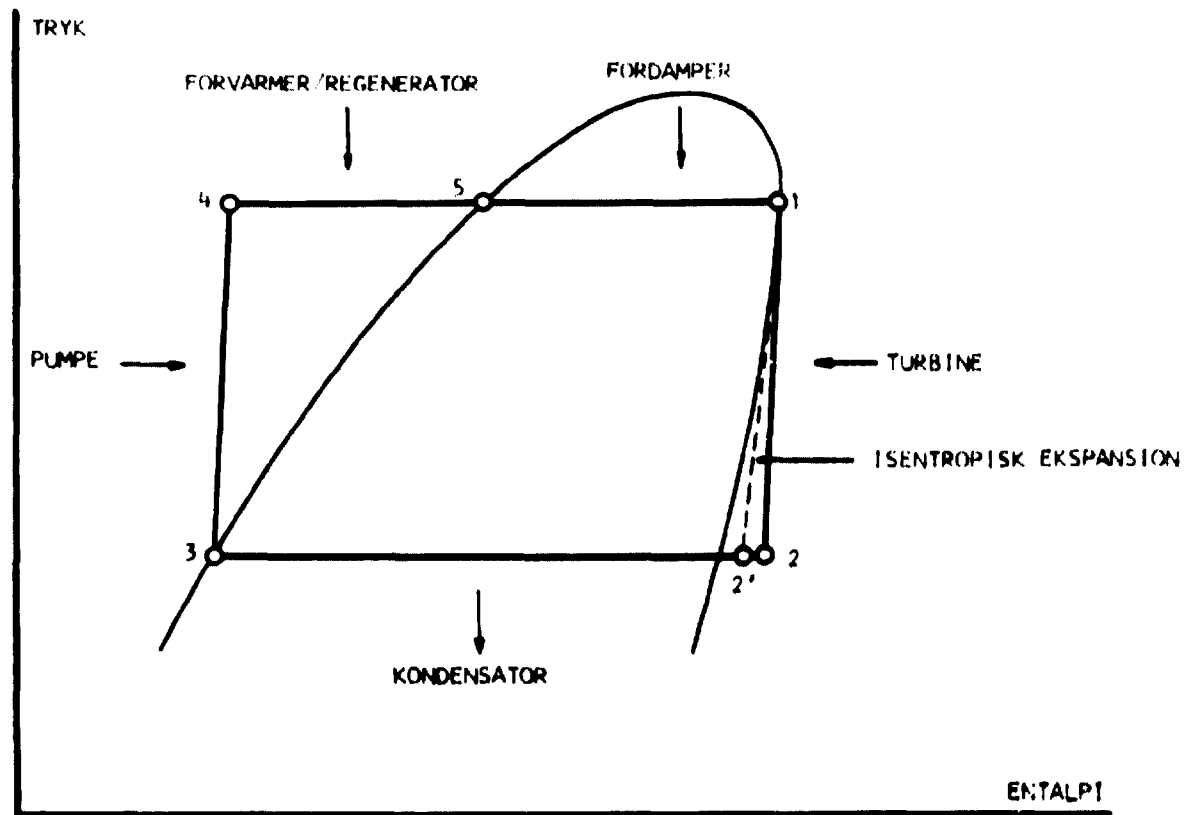
I Rusland er der opført et ikke nærmere specificeret anlæg til udnyttelse af geotermisk energi.

Generelt må det siges, at anlæggene ikke har været kommercielle, og at driftserfaringerne ej heller umiddelbart kan overføres til anlæg i kontinuert drift.

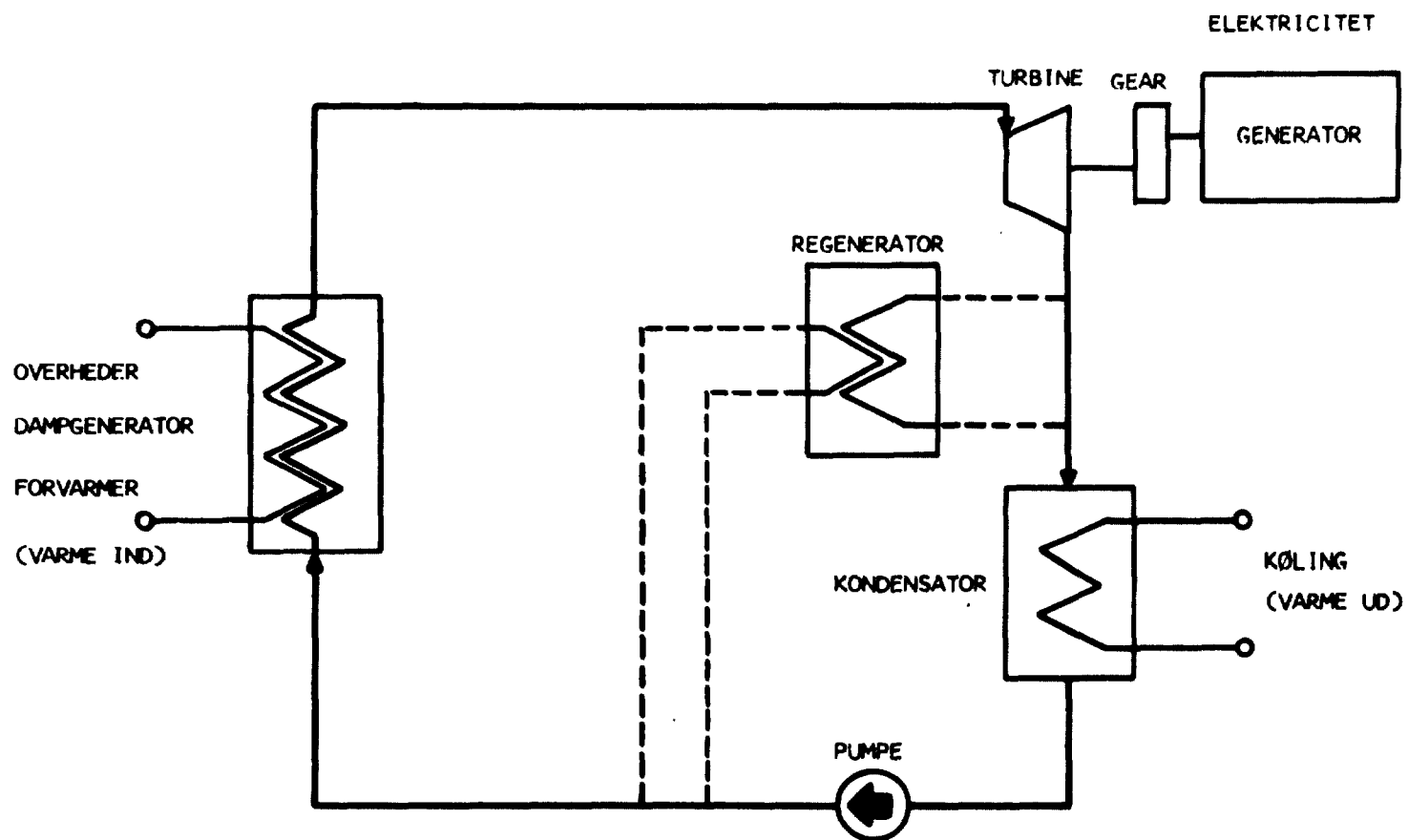
Det første virkeligt kommercielle anlæg til elproduktion er solgt i U.S.A. i 1977 og opstartet i midten af 1978.

Flere firmaer i U.S.A. udvikler i øjeblikket med regeringsstøtte anlag til elproduktion på grundlag af udstødningsvarmen fra store elproducerende dieselanlæg.

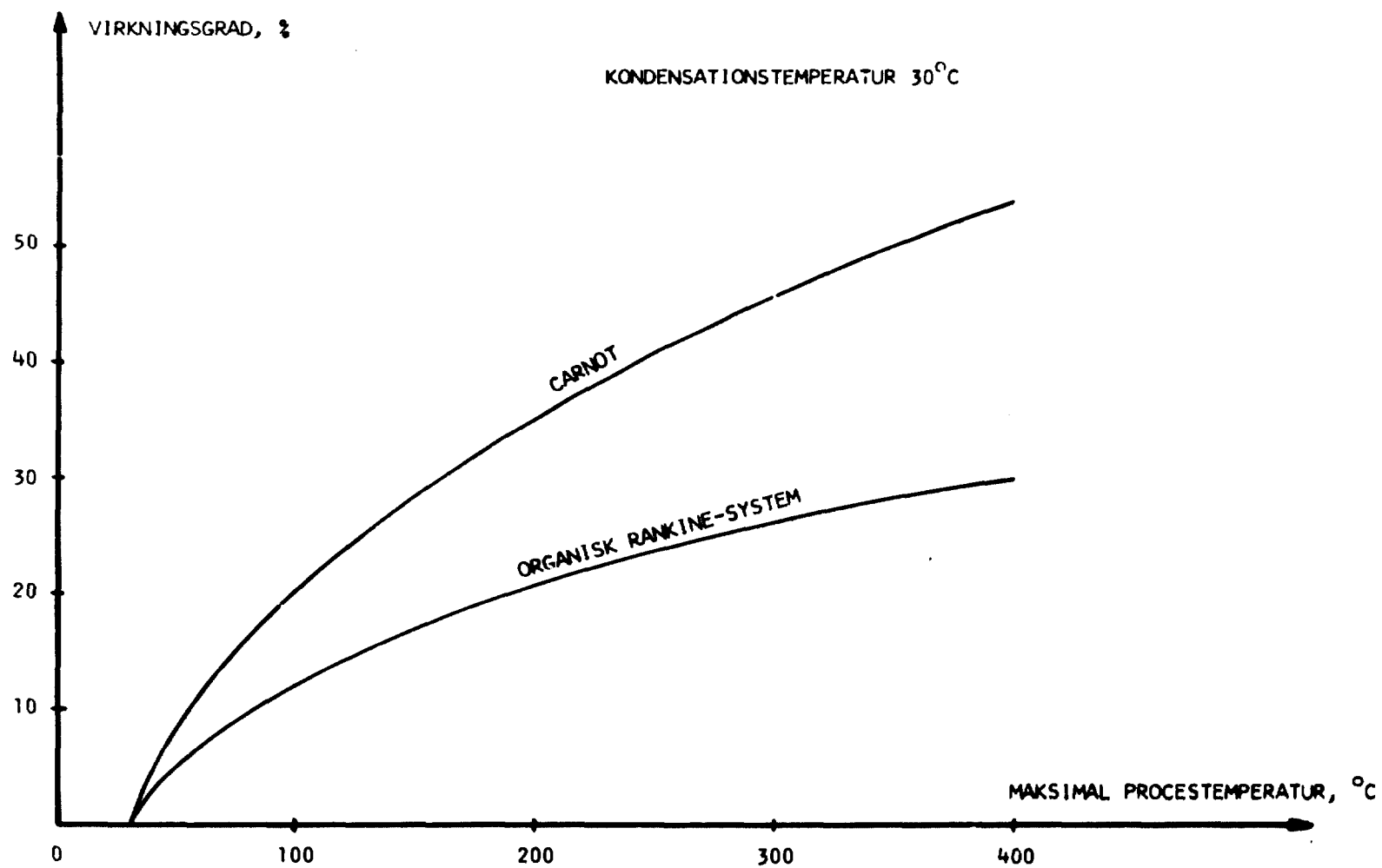
Inden 1980 vil der således være flere prototype-anlæg i kommerciel udførelse hver med en effekt på 500-600 KW i rutinemæssig drift.



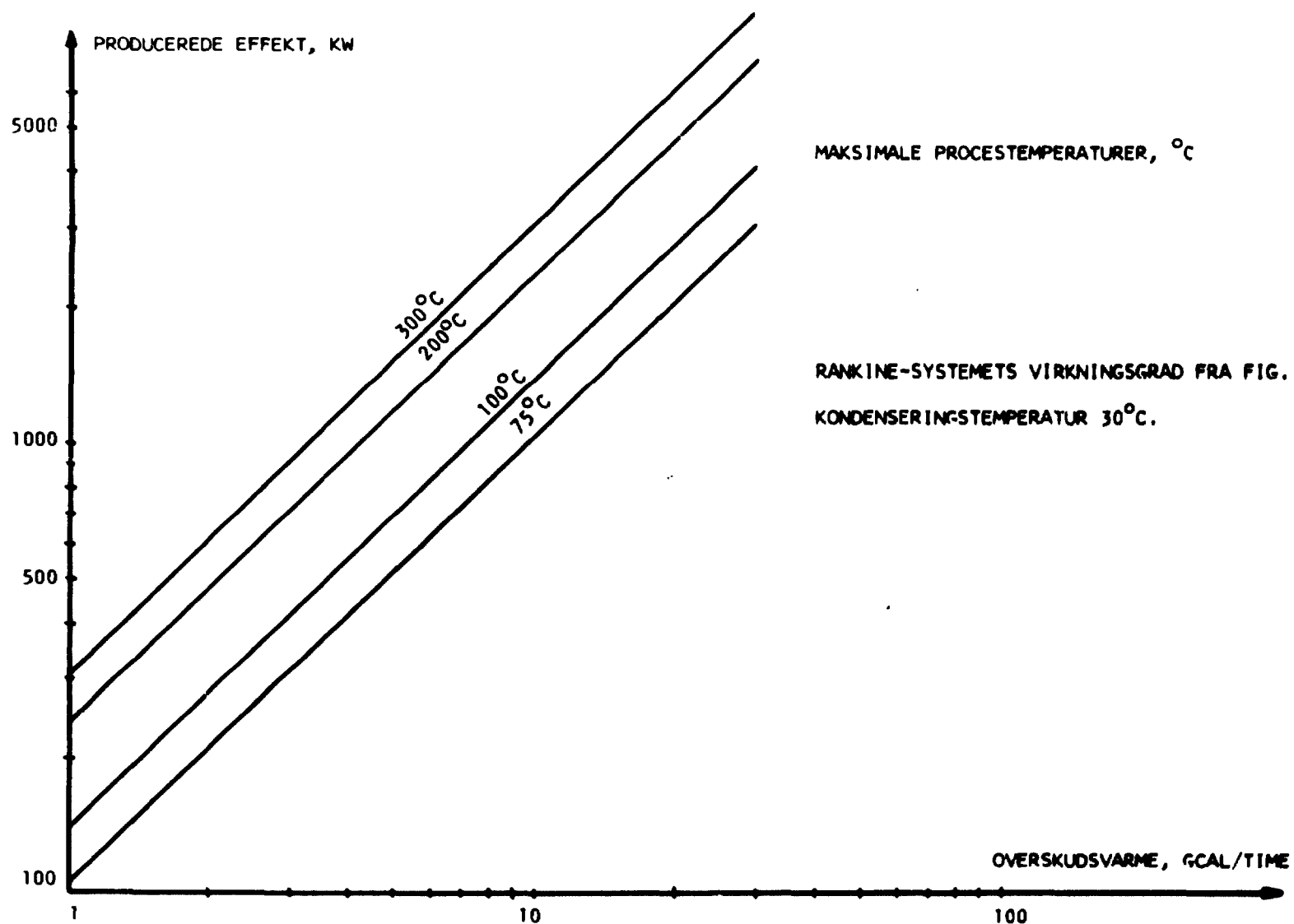
FIGUR 1. TRYK-ENTALPI DIAGRAM FOR UNDERKRITISK RANKINE-PROCES



FIGUR 2. SYSTEM TIL UDNYTTELSE AF LAVTEMPERATUR OVERSKUDSVARME



FIGUR 3. VIRKNINGSGRAD FOR ELPRODUCERENDE ANLÆG



FIGUR 4. PRODUCERET ELEKTRISK EFFEKT SOM FUNKTION
AF TILGÆNGELIG OVERSKUDSVARME

I. SYSTEMPÅLIDELIGHED

Dan Nielsen

INDLEDNING

Det er karakteristisk for mange typer af produktionsanlæg, at anvendelsen af større enheder betyder en økonomisk gevinst. Dette forhold indebærer på den anden side, at funktionsfejl kan få alvorlige konsekvenser, som kan være af såvel økonomisk som sikkerhedsmæssig art. Da udviklingen i mange tilfælde tillige hurtigt går i retning af større kompleksitet, kan det i forbindelse med projekteringen af et anlæg - hvortil der stilles store pålideligheds- eller sikkerhedskrav - være nødvendigt at udføre en mere systematisk analyse af risikoen for betydende funktionsfejl.

Risø's Elektronik- og Reaktorteknikafdeling har inden for feltet "pålidelighedsteknik" bidraget med udvikling og praktisk afprøvning af systematiske metoder til pålideligheds- og sikkerhedsanalyse af tekniske anlæg. Metoderne, der oprindeligt er udviklet til analyser af nukleare anlæg, omfatter:

- Procedurer for fejl- og risikovurdering af procesanlæg.
- Et grafisk symbolsprog til brug ved systematisk identifikation og beskrivelse af fejlforløb.
- Regnemaskineprogrammer til støtte for fejlanalyse og pålidelighedsberegning.

Siden begyndelsen af 70'erne har en stadig større del af aktiviteten været rettet mod anvendelse af metoderne til analyse af ikke-nukleare anlæg. Praktisk afprøvning af metoderne har således i en række tilfælde været udført i forbindelse med konkrete industrielle projekteringsopgaver.

I det følgende gives hovedlinierne i et analyseeksempel, der kan tjene til at belyse værdien af at udføre systematisk pålidelighedsanalyse under en projektering. Det drejer sig om analysen af et design-forslag til et instrumentluft-forsyningsanlæg, hvortil der var stillet høje pålidelighedskrav. Analysen,

der blev udført i forbindelse med et studiegruppearbejde indenfor Dansk Automationsselskab, er dokumenteret detaljeret i Risc-M-1903.

ANALYSENS FORMÅL

Analysen blev udført på grundlag af et flow-diagram af anlægget samt en systembeskrivelse med specifikationer for luftkvalitet og for hovedkomponenter. Det blev fastlagt, at analysen skulle udføres med henblik på at identificere eventuelle pålidelighedsmæssige svagheder i systemet. Endvidere skulle analysen udføres så detaljeret, at den kunne danne grundlag for overvejelser om design-forbedringer.

KARAKTERISTIK AF ANLÆG

Instrumentluftforsyningen - se simplificeret diagram i fig. 1 - skal med høj pålidelighed levere "ren og tør" luft til pneumatisk instrumentering og ventiler i et større procesanlæg. Det fuldt automatiske anlæg består af en kompressorsektion med tre oliefri stempelkompressorer, hvoraf den ene står stand-by, en receiver, en tørresektion med to kemiske tørreanlæg i parallel (2 x 50% tørrekapacitet) samt et sikkerhedssystem i form af en højtrykstank. Højtrykstanken skal i henhold til specifikationerne kunne levere den fornødne luft i ca. 1/2 time i tilfælde af totalt tab af kompressorer; herved gives der operatøren tilstrækkelig tid til en langsom nedlukning af procesanlægget. Et brat totalt tab af instrumentluften ville føre til beskadigelser i visse procesanlægsdele.

Det enkelte kemiske tørreanlæg består af to identiske adsorptions-beholdere, der ved automatisk omstyring af nogle ventiler skiftes til at tørre luften gennem en vis tid. En mindre mængde af luften, der tørres i den ene beholder, ledes igennem den anden og opvarmes elektrisk. Herved uddrives fugten fra tørrestoffet og regenereringsluften afkastes til atmosfæren.

HOVEDLINIERNE I ANALYSEN

I store træk omfattede analysen:

- en vurdering af om anlæggets specifikationer var opfyldt.
- en systematisk fejlanalyse hvor mulige fejlforløb blev identificeret, samt
- en vurdering af forventet hyppighed af betydende fejlkonsekvenser.

Check af specifikationer

En "uafhængig" (uvildig) analyse af et anlæg bør, så vidt det er muligt, inkludere en vurdering af om anlæggets specifikationer er opfyldt.

Der blev ved dette check af instrumentluftforsyningens specifikationer konstateret en fejl i højtrykstankens design, som ville kunne give flg. hændelsesforløb: Ved totalt kompressorbortfald afgiver højtrykstanken luft som påkrævet. Samtidig strømmer varm luft (ca. 135°C) fra nogle turbinekompressorer - der leverer procesluft - ind i tanken. Da denne imidlertid ikke var forsynet med en intern struktur, der kunne hindre den varme luft i at strømme direkte til tankens udløb, ville følgen blive, at der efter kort tid - væsentlig kortere end de specificerede 30 min. - ville ske en uddrivning af opsamlet vand i tørreanlæggene (regenereringstemperatur: 90°C).

Fejlanalyse

Ved den systematiske fejlanalyse af et anlæg identificeres mulige fejlforløb, som kan opstå p.g.a. fejl i anlægskomponenter (f.eks. lukket ventil åbner ikke når den skal). Sigtet er her primært at klarlægge betydende fejlkonsekvenser.

I fig. 2 er vist fejlforløb, som kan opstå p.g.a. fejl i et tørreanlæg. Som det ses, kan komponentfejl her føre til tre kategorier af betydende konsekvenser, nemlig "procesanlæg nedlukkes (af operatør)", "brat og totalt tab af instr.luft" og "reduceret tørrekapacitet".

Vurdering af hyppighed af betydende konsekvenser

På grundlag af statistiske fejldata og brugererfaringer med komponenter (kompressorer og tørreanlæg) af samme type, som var tænkt benyttet i instrumentluftforsyningen, blev hyppigheden af betydende fejlkonsekvenser beregnet. Hyppighederne for "nedlukning af procesanlæg" "totalt tab af instr.luft" og "reduceret tørrekapacitet blev således bestemt til henholdsvis 1.4/år, 0.2/år og 3.9/år.

ANALYSENS HOVEDKONKLUSION

Det foreslåede design blev af studiegruppen bedømt som værende utilstrækkeligt i pålidelighedsmæssig henseende. Det svageste led i konstruktionen var tørresektionen, hvor adskillige enkeltfejl med høj sandsynlighed ville føre til en betydende konsekvens. Navnlig var svigt af en omstyringsventil (V1 - V4 i fig. 1) kritisk, idet denne fejl ville føre til et så stort lufttab gennem afkastningsrøret for regenereringsluften, at højtrykssystemet blev "igangsat". På grund af den tidligere nævnte designfejl i højtrykstanken ville luft med temperatur højere end regenereringstemperaturen nå frem til det ikke-fejlede tørreanlæg i løbet af ca. 5 min. - hvis ikke operatøren forinden havde nået at isolere det fejlede tørreanlæg - og det opsamlende vand i dette ville blive frigivet (se fig. 2). Dette fejlforløb ville have samme hyppighed som det "initierende" ventilsvigt, da operatøren i kontrolrummet næppe ville kunne nå at foranledige det fejlede tørreanlæg isoleret i tide. Med andre ord: et ventilsvigt i det ene tørreanlæg ville med høj sandsynlighed p.g.a. en designfejl i et "sikkerhedssystem" (højtrykstanken) give anledning til en følgefejl i det andet tørreanlæg.

Selvom tørresektionen var opbygget med to parallelle tørreanlæg udgjorde disse således ikke et "sandt" redundant system. (Redundant system: system opbygget med som regel identiske parallelle enheder, der hver for sig kan udføre den ønskede funktion. Man sigter herved mod at opnå en høj pålidelighed, idet redundansen principielt skal sikre, at ingen enkeltfejl kan føre til fejl i funktionen).

DESIGN-FORBEDRINGER

En identifikation af evt. pålidelighedsmæssige svagheder i et design lægger op til overvejelser om, hvorledes pålideligheden kan blive forbedret.

For at forbedre pålideligheden af det foreslåede design af instrumentluftforsyningen, blev en række rekommandationer givet. Kun de tre vigtigste skal anføres her.

- Det blev anbefalet, at højtrykstanken blev modificeret således, at den - i tilfælde af totalt tab af kompressorer - ville kunne levere "kold" luft i ca. 30 min. som specificeret.
- Det blev anbefalet, at anvende tørreanlæg med 2 x 100% tørrekapacitet i stedet for kun 2 x 50%.
(Da en væsentlig del af rørledningsnettet til fordeling af instrumentluften skulle installeres udendørs, ville en tørresektion med kun 2 x 50% tørrekapacitet ikke have været tilstrækkelig til at sikre det specificerede dugpunkt i det tilfælde et tørreanlæg blev isoleret - for at tillade reparation - og udendørs-temperaturen var "lav").
- Det blev anbefalet, at der i afkastningsrøret for regenereringsluften i hvert tørreanlæg blev indsat en blænde (flow-begrænser), som hindrede, at højtrykssystemet blev igangsat i tilfælde af en "hængende" omstyringsventil.

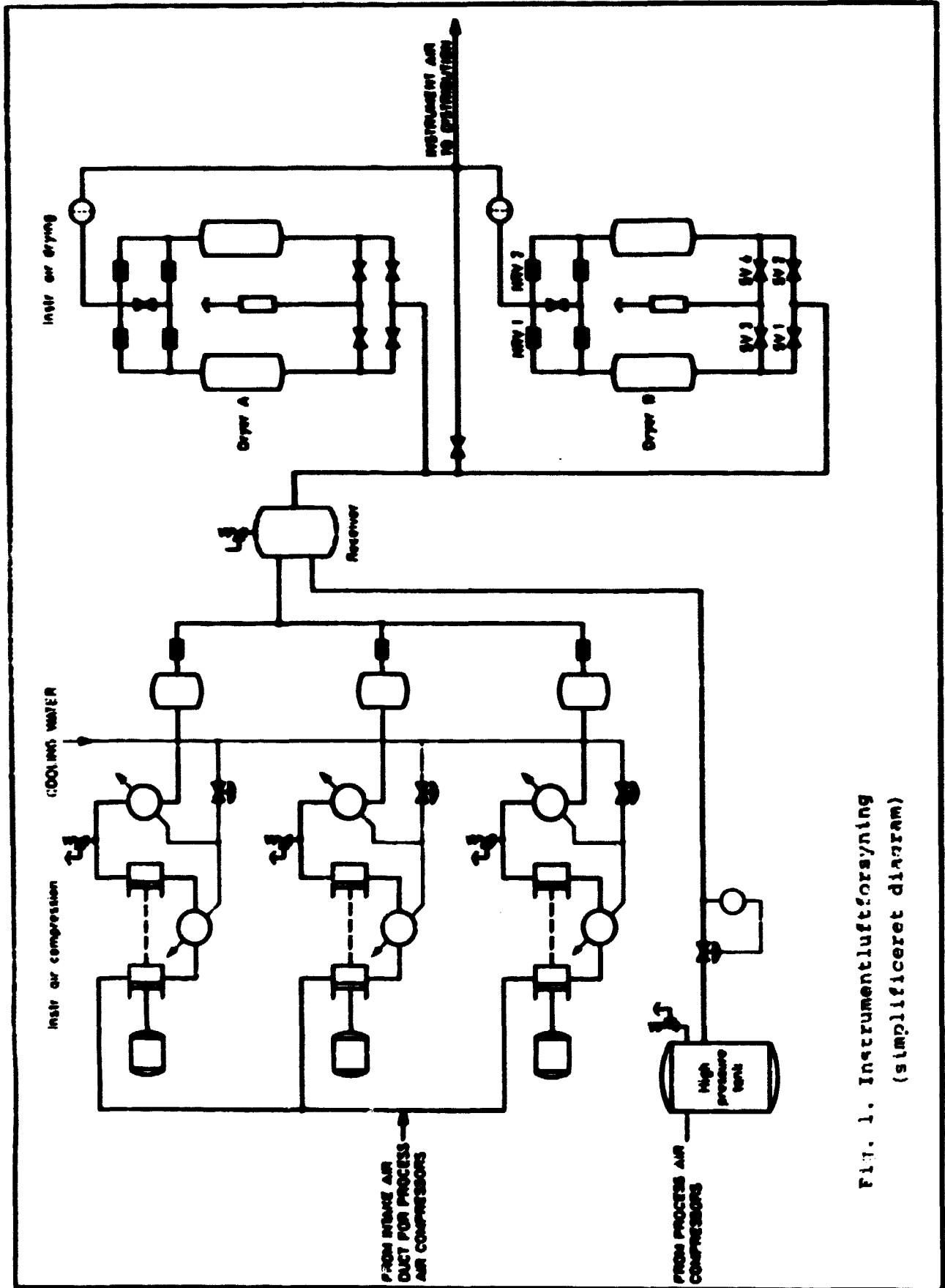
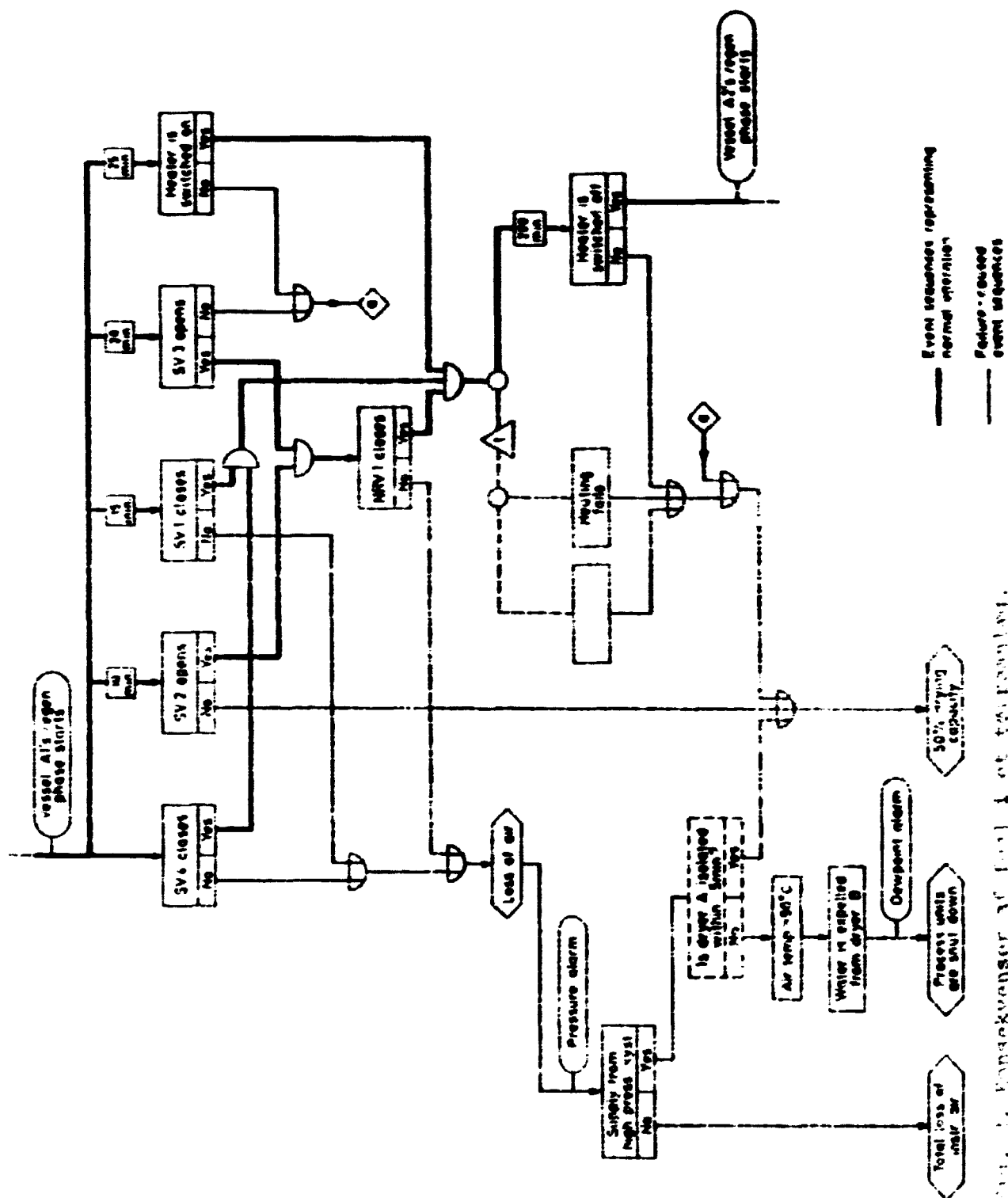


FIG. 1. Instrumentluftforsyning
(simplificeret diagram)



J. METAL - BRINT I VARMESYSTEMER

B. Vigeholm

I bestræbelserne på at forbedre nyttevirkningen af vore energikilder er anvendelse af overskudsvarme (spildvarme) og nedsættelse af transmissionstab nogle af de muligheder opmærksomheden er rettet mod.

Ved anvendelse af ukonstante kilder som sol og vind, i forsøg på at supplere vore energikilder, er et af hovedproblemerne tilpasning af produktion og forbrug, f.eks. ved varmelagring.

I modsætning til mange andre energiformer er varme uundgåeligt forbundet med lagringstab. Skål disse gøres forsvindende små kræves meget omhyggelig og meget omfattende isolation.

Alternativet til at lagre varmen er at omsætte den til en anden energiform, men denne proces er i reglen behæftet med lav nyttevirkning og ofte store investeringer.

En af de mere lovende muligheder er lagring af varmen i form af bindingsenergi i metal-brint systemer. En lang række metaller og metallegeringer kan optage brint og frigive den igen ved regulering af brintræk og temperatur.

Metal-hydrogen (brint) systemer

Baggrunden for metal-hydridernes anvendelighed som varmelagringsmulighed er den reversible proces:



hvor varmemængden for anvendelige metalsystemer ligger fra 25-80 kJ/mol H₂.

For ethvert hydriddannende metal afhænger hydrogenoptagelsen af tryk og temperatur, som vist på fig. 1.

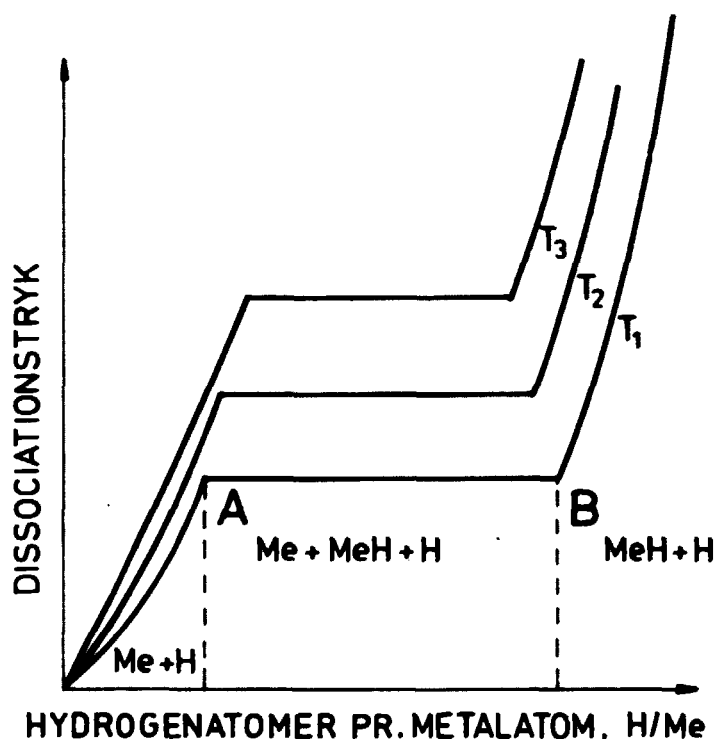
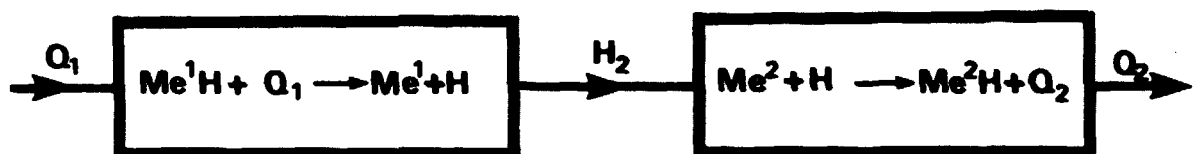


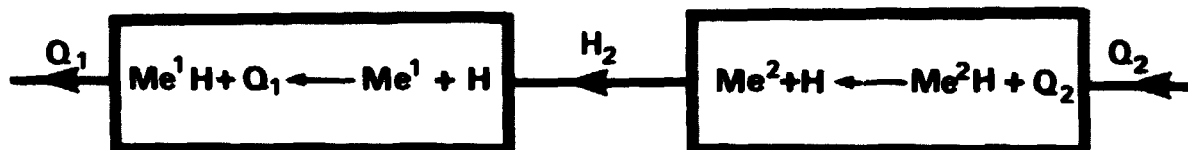
Fig. 1. Tryk-koncentrationsisotemer for metal-hydrogen. $T_3 > T_2 > T_1$. Ved hydrering må det pålagte hydrogentryk være større end hydridets dissociationstryk ved den pågældende temperatur. Indtil A er hydrogen i opløsning i metallet. Fra A til B sker en hydriddannelse under konstant tryk (ideale forhold). Ved B er alt metal omdannet til hydrid, og yderligere optagelse af hydrogen sker kun under stærkt stigende tryk.

For de kendte anvendelige metalsystemer er det brugbare temperaturinterval fra -20°C til 450°C ved hydrogentryk under 20 atm. Ved højere tryk er der flere mulige systemer, men de må tilskrives mindre praktisk anvendelighed.

I sammenhæng med udnyttelse af overskudsvarme kan metalhydrider anvendes enten til varmelagrning, som vist i fig. 2, eller til varmepumpning, hvor procesforløbet er vist i fig. 3.



a)



b)

Fig. 2 Princip for varmelagring i 2-hydridsystem. Dannelsesvarmen, Q , for de to hydridsystemer er forskellig ($Q_1 > Q_2$).

a) Lagring: Varmemængden Q_1 tilføres, hydrogen frigøres og optages i den anden beholder under afgivelse af Q_2 . Herved er der sket en nettooplægning $Q_1 - Q_2$.

b) Forbrug: Ved tilførsel af varmemængden Q_2 (f.eks. spildvarme) frigøres hydrogen, som optages i den første beholder under frigørelse af brugsvarmen Q_1 .

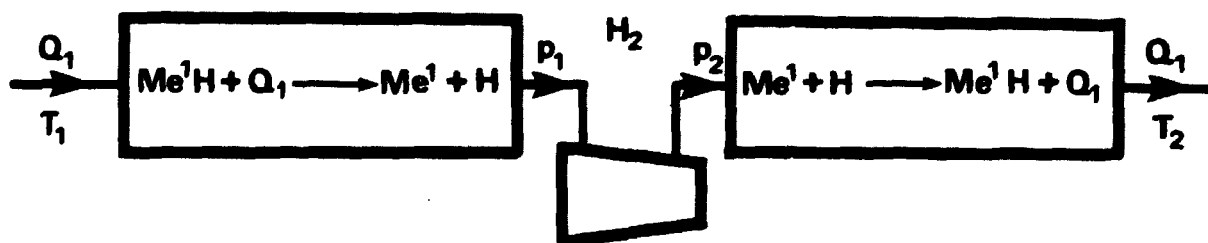


Fig. 3 Princip for varmepumpning med metalhydrid. De to beholdere indeholder samme hydrid. Varmen Q_1 tilføres ved temperaturen T_1 til den første beholder, som indeholder metalhydrid. Herved frigøres hydrogen, som ved hjælp af en kompressor tilføres den anden beholder, indeholdende metal under øget tryk. På grund af det højere tryk sker hydriddannelse ved en højere temperatur, T_2 , og med tilnærmelse frigives den oprindelige varmemængde Q_1 igen. Q_1 er altså "pumpet" fra temperaturen T_1 til T_2 .

De varmemængder, der kan lagres i hydridsystemer, er typisk 1200-5000 kJ/l mod 150-200 kJ/l for en vandtank. Hertil kommer, at hydridsystemer er tabsfri under lagringen, og de kræver ikke isolering.

Praktiske muligheder

Hydrid-systemerne fungerer i praksis udmærket og i specielle anvendelser er de nok også økonomisk acceptable. Drejer det sig derimod om lagring i store mængder af lavværdig varme er billedet et noget andet.

De bedst undersøgte systemer, baseret på legeringer af jern og titan eller legeringer af Ni med sjældne jordarter er for dyre, mens den formodentlig eneste, billige mulighed, Magnesium eller magnesiumbaserede legeringer i øjeblikket kun synes anvendelig ved temperaturer i nærheden af 400°C og ved ret høje tryk (mere end 10 atm).

For en givet varmemængde er de relative lagerpriser med vandtank, ($\Delta T = 60^\circ\text{C}$) som reference ca:

Vandtank	MgH ₂	FeTiH ₂	LaNi ₅ H ₆
1	1,2	15	80

Afhængigt af konstruktions og anvendelsesområde kan disse hydridpriser relativt sænkes betydeligt.

Prisen på det store areal til vandtank er f.eks. ikke indregnet.

Det forsøgsarbejde som er igang på Risø's Metallurgiafdeling er især rettet mod undersøgelser af Mg-hydridernes anvendelighed, idet vi forventer at kunne sænke temperatur/tryk-området til noget mere håndterligt uden for stort fald i lagringskapacitet pr. vægt-og varmeeenhed.

En anden mulig vej er en kombination af et dyrt lavtemperaturhydrid som "varmeabsorber" og et billigt højtemperaturhydrid som egentligt lager. Denne mulighed bl.a. søger vi at evaluere i et samarbejde med Norge og Sverige.

Det må på indeværende tidspunkt være rigtigt at tilskrive metalhydriderne gode muligheder som simpelt, tabsfrit varmelager til anvendelse ved:

Udnyttelse af industriel procesvarme ($T > 100^\circ\text{C}$).

Solopvarmning i fritidshuse.

Effektudjævning ved ukonstante, fornyelige kilder.

mens udnyttelse af lavtemperaturspildvarme,

solopvarmning af boliger,

klimaanlæg - i vort klima,

varmetransport m.m.

kræver væsentlige udviklinger.

Som led i effektudglatning i kraftforsyningssystem må FeTiH_2 -systemer betragtes som brugbare.

Brookhavens pilotskala-anlæg:

El \rightarrow brint \rightarrow Hydrid \rightarrow el

elektrolyse hydrering brændselscelle

har en nyttevirkning på ca. 35%. Den "lagrede" el koster altså 3 gange så meget som den direkte producerede, hvilket er mindre end halvdelen af, hvad spidsbelastningsværker kan producere til.

Det må dog understreges, at her er lagringseffekten selve brinten og ikke varmeenergien fra Metal-brint bindingen.

Af interesse for varmestyring bør nævnes den mulighed der ligger i at kunne regulere tryk med temperatur og omvendt i et lukket system med små volumener og uden bevægelige dele.

K. FUSION, FREMTIDENS ENERGIFORSYNING?

af

P. Nielsen

Den dag menneskeheden behersker fusionsprocesserne, har vi definitivt løst vort energiproblem. Fusionsforskningens mål er at finde metoder til produktion af fusionsenergi i en sådan form, at den kan drive generatorerne i vore kraftværker. I de sidste få år er der sket så store fremskridt inden for denne forskning, at man nu mere tror på, at problemerne kan løses. Samtidig begynder der at tegne sig et billede af, hvornår en fusionsreaktor kan bygges, og hvordan den vil komme til at fungere.

Ligesom fissionsenergi, der produceres i atomreaktorer, er fusionsenergi en atomkerneenergi. Medens fissionsenergien udvikles ved spaltning af tunge atomkerner, f.eks. urankerner, så frigøres fusionsenergien, når kerner af lette grundstoffer smelter sammen; når de fusionerer. Solen og stjernerne er store fusionsreaktorer; al den energi, de udsender, er dannet ved fusionsprocesser i deres indre. På jorden er der hidtil kun produceret fusionsenergi i brintbomber.

Luftarten tung brint, også kaldet deuterium, er brændstoffet i en fusionsreaktor. Deuterium findes i alle vandforekomster. Ved fusion af den mængde deuterium, der findes i en liter vand, frigøres samme energimængde som ved afbrænding af 300 liter olie. Den dag vi har en fusionsreaktor arbejdende med deuterium, har vi i verdenshavene en energikilde så stor, at der med menneskehedens nuværende forbrug er nok til 5 milliarder år.

Den mest nærliggende fusionsreaktor vil kun kunne arbejde med en blanding af deuterium og tritium. Tritium findes ikke i naturen, men vil kunne fremstilles i reaktoren ud fra grundstoffet lithium. Det bliver i så fald lithiumforekomsterne, der bestemmer, hvor meget fusionsenergi, vi kan udvinde. En vurdering af lithiumforekomster, der kan udvindes til dagspris, synes at vise, at disse vil kunne dække vort energibehov i 5000 år.

Det er meget svært at få fusionsprocesserne til at forløbe. For at få to atomkerner til at smelte sammen må de bringes meget tæt til hinanden. Da atomkerner har positiv elektrisk ladning, frastøder de hinanden, og de kan kun komme tæt nok sammen, hvis de bevæger sig mod hinanden med stor fart. En fusionsreaktor vil komme til at arbejde efter et princip, hvor man opvarmer brændstoffet i en beholder. Fysisk betyder en høj temperatur, at atomerne i brændstoffet bevæger sig hurtigt rundt mellem hinanden; jo højere temperatur jo hurtigere bevægelse. Ved tilstrækkelig høj temperatur er hastigheden så stor, at kernerne, når de støder mod hinanden, kommer tæt nok sammen til at fusionere og altså udvikle energi. Brændstoffet i en fusionsreaktor må opvarmes til ca. 100 millioner grader, før processerne går i gang.

Ved temperaturer på ca. 3000 grader vil alle faste stoffer smelte. Der findes derfor ikke noget stof, der kan virke som beholder for et 100 millioner grader varmt fusionsbrændstof. Kontakten mellem beholdervægge og brændstof vil ødelægge væggene og afkøle brændstoffet. Forskernes store problem er at finde en metode, hvorved brændstoffet kan holdes isoleret fra væggene. Her kommer den meget høje temperatur indirekte til hjælp. Ved temperaturer op til nogle få tusinde grader består fusionsbrændstoffet endnu af atomer, dvs. af partikler, der indeholder en positivt ladet atomkerne med en negativt ladet elektron bevægende sig omkring kernen. Da disse atomer er elektrisk neutrale, kan de ikke påvirkes af magnetiske felter. Ved højere temperaturer bliver sammenstødene så hårde, at atomerne slås i stykker i elektroner og i kerner (ioner). I det 100 millioner grader varme fusionsbrændstof er atomerne slået i stykker, og det består af en blanding af disse ladede partikler; en sådan blanding kaldes et plasma. Ladede partikler kan påvirkes af magnetfelter, og det kan et plasma også. Forskerne håber at kunne holde fusionsplasmaet isoleret ved omkring det at skabe et magnetfelt, som holder det sammen og forhindrer det i at komme i kontakt med beholdervæggene.

For at få et indtryk af, hvor fusionsforskningen står i dag, må vi se på de krav, der skal opfyldes, før en reaktor kan bygges. Det er som nævnt nødvendigt at opvarme fusionsplasmaet til

ca. 100 millioner grader. Det kræver energi at varme et plasma op til en så høj temperatur. Når processerne er i gang, produceres der energi. For at få et energimæssigt udbytte må der udvikles mere energi end der er medgået til opvarmningen. Den energimængde, der udvikles, afhænger af, hvor lange processerne holdes i gang; den tid kaldes fusionsplasmaets levetid. Den udviklede energimængde afhænger også af, hvor tæt plasmaet er; jo tættere partiklerne er, des flere fusionsprocesser finder sted, og des mere energi udvikles. Betingelsen for overskud af energi er, at produktet ($n\tau$) af levetiden og tætheden er tilstrækkeligt højt (mindst 200 billioner sekunder pr. cm^3). Det sidste krav er det vanskeligste.

I ca. 20 år har fusionsforskerne arbejdet med at udforme beholdere og magnetfelter på en sådan måde, at fusionsplasmaets isolering fra væggene er god nok. Indtil 1968 var de opnåede resultater nedslående. I alle de forsøg, man havde gjort, viste plasmaet en tilbøjelighed til at svinge på forskellige måder. Svingningerne voksede og voksede og endte med at blive så store, at plasmaet ramte beholdervæggene. Disse voksende svingninger kaldes ustabiliteter, og problemet er at finde beholderformer og magnetfeltudformninger, hvor disse ustabiliteter ikke eksisterer.

I 1968 skete der et betydeligt gennembrud inden for fusionsforskningen. Russiske forskere blev i stand til at holde et varmt plasma indesluttet i et magnetfelt meget mere effektivt end tidligere og uden tegn på ustabiliteter. Russerne kaldte deres opstilling en tokamak. I en tokamak har beholderen form som en stor bilslange, i hvis midte plasmaet ligger som en lukket ring. Selv om de russiske resultater langt fra var gode nok for en fusionsreaktor, affødte de en så stor optimisme, at mange fusionslaboratorier gik i gang med tokamakeksperimenter. I de 10 år, der nu er forløbet, er der opnået bedre og bedre resultater. Det væsentligste i dette gennembrud var forudsigelsen, at man blot behøvede at gøre eksperimentet større for at forbedre det kritiske punkt $n\tau$.

Udviklingen siden 1968 er illustreret på figuren. Den vandrette akse viser temperaturen, og den lodrette akse det omtalte produkt af levetid og tæthed. Reaktorområdet er vist øverst i

højre hjørne. Nederst i venstre hjørne er vist de russiske resultater fra 1968. Resultater opnået på andre maskiner over hele verden er markeret med årstal for at vise den tydelige forbedring i de sidste ti år.

For nylig har pressen hørt om betydelige fremskridt i Princeton, U.S.A. På figuren er dette eksperiment markeret med 1978. Som det fremstår på figuren, er disse resultater ikke specielt revolutionerende, men nærmest et naturligt trin i udviklingen. Det væsentligste i dette fremskridt kan dog ikke ses ud af figuren. Når vi bygger større og større eksperimenter, forventer vi automatisk en forbedring af plasmalevetiden. Dette kan vi forstå simpelt. Når plasma bliver tykkere, tager det længere tid for en partikel fra plasmaets midte at nå ud til overfladen. Derimod kan vi ikke forvente nogen automatisk forøgelse af temperaturen, når vi gør eksperimentet større. På grund af særlige stabilitetsforhold i tokamakopstillinger er det nærmest tværtimod. Skal vi derfor nå reaktorumrådet, må vi udvikle en særlig metode til at varme plasmaet op. Resultaterne fra Princeton viser, at vi nu har mindst en metode, vi kan anvende til dette formål. Samtidig viser disse resultater, at når vi foretager denne opvarmning, sker der ikke uforudsete forstyrrelser (svingninger), der igen kunne indvirke på levetiden.

Eksperimenter som det i Princeton koster 100-200 millioner kroner at bygge. Inden vi bygger en reaktor, vil vi passere mindst to generationer af større eksperimenter. Den næste generation vil være af størrelsen 5-10 m i diameter. Sådanne forsøg koster omkring 1 milliard kroner stykket. Konstruktion af denne størrelse eksperimenter er planlagt eller påbegyndt i U.S.A., U.S.S.R., Japan og i Europa inden for rammerne af Euratom.

I erkendelse af fordelene ved en koordineret indsats inden for et så ressourcekrævende felt har EF-landene gennem en år-række samarbejdet på fusionsforskningsområdet. Samarbejdet koordineres af EF-organet Euratom, som har indgået associeringskontrakter med de enkelte landes fusionslaboratorier. Euratom betaler ca. 30% af laboratoriernes budgetter mod til gengæld at få indflydelse på forskningsprogrammerne. Det har herved været muligt at opstille et fælleseuropæisk fusionsforskningsprogram, som i omfang tåler sammenligning med forskningsprogrammerne i de

andre store lande. Med et samlet budget på ca. 500 millioner kroner i 1977 tegnede EF-landene sig for ca. 15% af verdens budgettet. Danmarks fusionsforskning, der foregår på Risø, har siden EF-medlemskabet været tilknyttet det europæiske program. Flere lande uden for EF, bl.a. Sverige, deltager ligeledes i samarbejdet.

Hidtil er al fusionsforskning i Europa foregået på de nationale laboratorier. Mange af disse har tokamakarbejde på programmet; to af punkterne på diagrammet repræsenterer europæiske resultater. Da det for 5 til 6 år siden blev klart, at yderligere fremgang ville kræve virkelig store maskiner, besluttede man at planlægge et sådant stort eksperiment, som skulle iværksættes af EF-landene i fællesskab. I efteråret 1975 var planerne færdige. Cpstillingen kaldes JET (Joint European Torus), diameteren er 8,5 m, den vil koste ca. 1 milliard kroner. Byggetiden vil være ca. 5 år.

Den endelige placering af JET blev vedtaget i oktober 1977 med betydelig forsinkelse i forhold til den opstillede tidsplan. Siden oktober er tingene dog forløbet tilfredsstillende og adskillige af komponenterne til opbygning af maskiner er bestilt hos leverandører over hele Europa. Ligeledes er man i øjeblikket ved at ansætte det nødvendige personale, som hentes fra de forskellige landes fusionslaboratorier.

Fra JET forventes resultater i den lodrette ovale figur på diagrammet. Da denne figur skærer ind i reaktorområdet, er der en vis chance for, at JET kan opfylde de to betingelser. JET vil dog aldrig blive en energiproducerende reaktor; hensigten med den er at studere plasmaer, der er nær ved at opfylde de to betingelser. Ved hjælp af resultaterne fra JET og fra lignende eksperimenter i USA, USSR og Japan håber man i midten af 1980'erne at kunne planlægge eksperimenter, som skal arbejde i reaktorområdet. Giver disse eksperimenter de resultater, som man i øjeblikket tror og håber, vil man i 1990'erne kunne gå i gang med en prototypereaktor, altså en eksperimentel reaktor, der producerer energi. Om dette opnås, afhænger både af, om man kan opfylde de to betingelser og af, om man kan klare en række teknologiske problemer, som også må løses. Fusionsenergien kan tidligst få en

reel betydning ét til to årtier ind i næste århundrede.

Hvilke fordele og ulemper fusionsenergien vil medføre kan naturligvis ikke siges med sikkerhed; men der tegner sig et billede. Blandt fordelene kan nævnes, at brændstoffsforsyningen ikke bliver afhængig af nogle få lande: deuterium, som indgår i vand, findes overalt; lithiumforekomsterne er også spredte. Et fusionskraftværk vil ikke, som nuværende kraftværker, udsende røg med svovl og andre giftige stoffer i atmosfæren. Hvis hovedparten af energiproduktionen bliver fjernet fra de fossile brændstoffer, vil de sundhedsmæssige ulemper ved brydning og transport af disse stoffer nedsættes, og endelig vil kul- og olieforekomsterne blive efterladt til vore efterkommere for mere nødvendige formål.

Den største ulempe ved fusionsreaktoren er sikkert, at den skal være stor for overhovedet at kunne virke. Man regner med, at en fusionsreaktor må være så stor, at den producerer lige så meget energi som alle nuværende danske kraftværker tilsammen. Der kan derfor blive problemer med fusionskraftværkets indpasning i det elektriske net; og udnyttelse af fusionsenergien kan kun blive aktuel i tæt befolkede og stærkt industrialiserede områder. Da fusionsreaktorer arbejder med kerneprocesser, er der også problemer med radioaktivitet. Tritium, som indgår i fusionsprocesserne, er et radioaktivt stof, som ikke må slippe ud i naturen i større mængder. Ved fusionsprocesserne dannes der neutroner, som skal indfanges i beholderens vægge. Et af de teknologiske problemer bliver at finde et vægmateriale, som kan indfange neutronerne uden at blive stærkt radioaktivt, samtidig med at det kan modstå den kraftige bestråling fra det varme plasma. Problemerne med radioaktivitet forventes dog at blive mindre end for fissionsreaktoren.

Da fusionsenergien tidligst vil kunne gøre sig gældende i energiforsyningen et stykke ind i næste århundrede, må vor forskningsindsats betragtes som en afbetaling på den gæld til vore børn, som vi sætter os i ved uhammet at opbruge de tilgængelige forekomster af fossile brændstoffer. Set under denne synsvinkel har de rige lande en forpligtelse til at yde en indsats for fusionsforskningen. I gennemsnit ofrer de store industrilande lige så meget på denne forskning om året, som 12 timers forbrug af olie og kul koster dem. Danmark ofrer årligt et beløb, som svarer til vort forbrug af kul og olie i 3 timer.

